



Planification stratégique d'une Supply chain sous contraintes d'incertitude : affectation de la production et dimensionnement des ressources

Pierre-Alban Pernot

► To cite this version:

Pierre-Alban Pernot. Planification stratégique d'une Supply chain sous contraintes d'incertitude : affectation de la production et dimensionnement des ressources. Autre [cs.OH]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2013. Français. <NNT : 2013CLF22425>. <tel-01037988>

HAL Id: tel-01037988

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01037988>

Submitted on 23 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'Ordre : 2425

EDSPIC : 637

Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand II

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT FERRAND

THESE

Présentée par

Pierre-Alban Pernot

Diplômé de Polytech'Clermont-Ferrand (2010)

Ingénieur en Génie Mathématique et Modélisation

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : INFORMATIQUE

Planification stratégique d'une Supply chain sous
contraintes d'incertitude : affectation de la
production et dimensionnement des ressources

Soutenue publiquement le 18 décembre 2013 devant le jury :

Madame	Valérie BOTTA-GENOULAZ	Rapporteur
Monsieur	Jacques LAMOTHE	Rapporteur
Monsieur	Alain QUILLIOT	Examineur
Monsieur	Hamid ALLOUI	Examineur
Monsieur	Olivier ZUBER	Examineur
Monsieur	Sylverin KEMMOE	Co-Directeur de thèse
Monsieur	Nikolay TCHERNEV	Co-Directeur de thèse

Remerciements

Ce doctorat achevé, mes premiers remerciements vont naturellement aux membres de mon jury de thèse. Ainsi, je remercie Mr Quilliot de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes durant ces trois années mais également d'avoir présidé mon jury de thèse. A ce titre, je remercie également Mme Botta-Genoulaz et Mr Lamothe, tous les deux rapporteurs de mes travaux de doctorat, pour les avis éclairés qu'ils ont su me donner. A ceux-ci s'ajoute, pour les mêmes raisons, Mr Allaoui pour sa participation à mon jury.

Je souhaite également adresser des remerciements appuyés aux personnes m'ayant encadrées durant ces travaux de thèse. Ainsi, je remercie vivement Mr Tchernev et Mr Kemmoe pour leurs conseils, leur implication sans faille et d'une manière générale pour leur accompagnement durant ces trois dernières années. Au-delà de l'aspect purement professionnel, j'ai pu apprécier leur grande qualité humaine ayant permis la réalisation de cette thèse dans un environnement des plus propices. A ces deux personnes, il convient également d'ajouter Mr Zammit sans qui ces travaux de doctorat n'auraient pu avoir lieu. Ainsi, au-delà de son implication dans la réalisation de cette thèse, je tiens à le remercier vivement pour les conditions dans lesquelles il m'a permis de mener mes travaux, au sein de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, ainsi que pour les précieux conseils qu'il a pu apporter tout au long de leur réalisation. Au même titre, je tiens également à adresser mes remerciements à Mr Hage, son successeur à la tête de cette entité.

Ces travaux de doctorat ont porté en partie sur une des problématiques de la planification stratégique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin. Aussi, je tiens à remercier chaleureusement Mr Zuber, le responsable de ce processus, pour les nombreuses connaissances industrielles qu'il a pu m'apporter et les précieux conseils qu'il a su me donner. De par ses qualités humaines, celui-ci a su rendre nos nombreuses réunions (de fin de journée !!!) plaisantes et enrichissantes. Ce fut un réel plaisir de travailler avec lui. Bien entendu, je remercie pour les mêmes raisons Mr De Biasi, son prédécesseur avec qui ces travaux de doctorat ont débuté. En plus de ces deux personnes, je tiens également à remercier particulièrement Mr Cordina, responsable de l'ingénierie Supply Chain lors de la réalisation de ce doctorat. Etant rattaché à ce service, celui-ci a su m'y intégrer tout en me laissant la liberté nécessaire à la réalisation de mes travaux de recherche. Ce sentiment d'intégration provient également de la grande qualité des membres de l'ingénierie Supply Chain. Ainsi, j'adresse un grand merci à Emmanuel, Chantal, Claire, Sonia, Mickael, Nicolas R., Benoît, Paul et Joël pour les nombreuses discussions enrichissantes partagées autour d'un café ou lors des déjeuners mais également pour leur bonne humeur au quotidien. A ceux-ci s'ajoutent également pour leur aide Thérèse, Thierry et Thomas. Au-delà de l'ingénierie Supply Chain, je remercie également l'équipe « capacity planning », à commencer par leur responsable (Mr Laroux), pour les nombreuses explications qu'ils ont su me donner et leur disponibilité. Pour les mêmes raisons, j'adresse mes remerciements d'une manière générale à l'ensemble des équipes de la Supply Chain Michelin Tourisme Camionnette Europe.

En plus de la société Michelin, ces travaux ont également été menés au sein du laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) de Clermont-Ferrand. Dans ce contexte, j'ai pu rencontrer des personnes de grande qualité. Ainsi, je remercie particulièrement Mr Lacomme pour le goût de la Recherche Opérationnelle qu'il a su me donner durant mes années d'école d'ingénieur ainsi que pour les conseils avisés délivrés tout au long de ce doctorat.

Au-delà de l'aspect purement « professionnel », ces trois années de doctorat se sont traduites par la rencontre de personnes enrichissantes et précieuses. Ainsi, je remercie particulièrement Anthony, Nicolas C. et Etienne, pour leurs conseils et les déjeuners partagés ainsi que Raskmey, Maxime, Benjamin, Libo, Dié, Jonathan, Frédéric, Amine, David, Ahmed et Paul pour les précieux moments de « décontraction » passés ensemble.

Enfin, je ne puis terminer cette partie sans un mot pour ma famille et mes amis proches. Ainsi, je n'aurais pas assez de mots pour remercier mes parents et Maï-Lyna pour leur soutien sans faille lors des moments de doutes mais également pour l'ensemble des choses qu'ils ont pu m'apporter. A ceux-ci s'ajoutent pour les mêmes raisons Mr et Mme Bath, Manuel et Bérangère ainsi que Mr et Mme Chabanet.

A Paul Chupin qui nous a quitté trop vite pour pouvoir suivre les travaux réalisés durant ces trois années de doctorat.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Contexte et problématique	7
1. Introduction	9
2. Contexte.....	9
3. Problématique.....	12
4. Travaux de recherche	31
5. Conclusion.....	35
Chapitre II : Le Supply Chain Network Design - état de l'art	37
1. Introduction	39
2. Le SCND : définition.....	39
3. Le SCND dans un contexte déterministe.....	42
4. SCND et incertitude	50
5. SCND et flexibilité.....	61
6. Positionnement de nos travaux au sein de la littérature : conclusion	72
7. Conclusion.....	80
Chapitre III : Modélisation du problème ASPDRF dans un contexte déterministe	83
1. Introduction	87
2. Modélisation des contraintes industrielles.....	87
3. Modèle linéaire	102
4. Conclusion.....	119
Chapitre IV : Métaheuristique pour le problème ASPDRF	121
1. Introduction	125
2. Définition.....	125
3. GRASP pour le problème ASPDRF dans un contexte déterministe	127
4. Performance de la métaheuristique	155
5. Conclusion.....	171
Chapitre V : Métaheuristique dans un contexte incertain	173
1. Introduction	175
2. Intégration du GRASP dans un processus de simulation de Monte Carlo	175
3. Application numérique	178
4. Conclusion.....	187
Chapitre VI : Environnement intégré de planification.....	189
1. Introduction	191
2. Schématisation de l'environnement intégré de planification	191
3. Processus de planification stratégique.....	195
4. Processus de planification tactique.....	207
5. Processus de planification opérationnel	212
6. Temps de résolution et taille des problèmes considérés.....	222
7. Conclusion.....	223
Conclusion générale	225
Bibliographie.....	229
Annexes	243

Introduction générale

Depuis plusieurs années, l'environnement économique n'a cessé de changer pour aboutir à un marché globalisé. Ces évolutions proviennent notamment de l'essor et de l'amélioration des différents moyens de transport, « réduisant les distances » par une accélération des délais de livraison, ainsi que de l'avènement de nouvelles technologies de communication. Ceci a, en effet, facilité les échanges et favorisé l'émergence de nouveaux acteurs au sein de marchés initialement occupés par des entreprises locales. Afin de faire face à cette hausse de la concurrence et à leur tour investir de nouveaux territoires, ces dernières ont dû s'adapter. Ainsi, est apparue la notion de Supply Chain pouvant être définie comme « un processus intégré au sein duquel intervient un certain nombre d'entités (i.e fournisseurs, fabricants, distributeurs et revendeurs) travaillant ensemble afin d'acquérir des matières premières, convertir ces matières premières en produits finis et livrer ces produits finis aux revendeurs » [Beamon, 1998]. Cette notion repose sur le principe que seule la recherche du profit maximum d'un tel système peut assurer la pérennité des différents acteurs le composant. Par conséquent, une Supply Chain doit être considérée comme un tout et non une somme d'entreprises distinctes. Elle suppose donc l'abandon, de la part de ces dernières, de leur vision individualiste au profit d'une intégration de leurs partenaires au sein de leurs processus décisionnels. Une telle mutation se justifie par l'apport d'une réelle coordination des différentes décisions de la part des acteurs rentrant dans la réalisation d'un bien ou d'un service. Elle permet ainsi d'éviter des désagréments tels que des ruptures d'approvisionnements ou encore des problèmes de distribution.

La notion de Supply Chain tend donc, petit à petit, à remplacer la vision initiale d'une entreprise isolée ayant des relations avec ses fournisseurs et acheteurs basées uniquement sur le profit court terme. Ainsi, aujourd'hui il ne convient plus de parler de concurrence entre les entreprises mais entre les Supply Chain (propos tenus par John Gossman, vice-président de Allied Signal, en 1997 et rapportés dans [Vickery et al., 1999]). Ce bouleversement a modifié profondément les processus de pilotage des entreprises ; celles-ci devant prendre leurs décisions d'un commun accord avec leurs partenaires au sein de la Supply Chain à laquelle elles appartiennent. Parmi les différents processus décisionnels impactés, se trouvent ceux relatifs à la planification ; ces derniers pouvant être classifiés en trois sous-processus distincts selon l'horizon de temps considéré ([Anthony, 1965]; [Fleischmann et al., 2002]; [Bertrand, 2003]; [Manzani and Gamberini, 2008]), à savoir :

- (i) La planification stratégique consistante à prendre des décisions long terme (i.e. pour des horizons allant de 5 à 10 ans) dont l'impact sur le système considéré se mesure pendant de nombreuses années [Simchi-Levi et al., 2004]. Celles-ci concernent notamment le nombre, la localisation des différentes entités et usines, le dimensionnement capacitaire, l'affectation des productions aux usines ainsi que le dimensionnement des ressources.
- (ii) La planification tactique dont le but, dans le cadre des décisions prises au niveau stratégique et en intégrant les nouvelles données du marché, est de piloter les activités de la Supply Chain à moyen terme (i.e pour des horizons allant de 6 à 18 mois) afin de satisfaire au mieux la demande à coût minimum. Elle consiste par exemple à établir un plan de production, à gérer l'utilisation des ressources ainsi qu'à définir la part de la demande à satisfaire par l'intermédiaire de la réalisation d'un plan de vente.
- (iii) La planification opérationnelle correspondante à un processus court terme (1-3 mois) ayant pour but de piloter les activités quotidiennes de production et de distribution.

Ce passage d'une vision individualiste à une approche Supply Chain s'est manifesté de différentes manières au sein de ces sous-processus décisionnels. Par exemple, dorénavant, les décisions de production (détermination du dimensionnement capacitaire au niveau stratégique, établissement d'un plan de production et d'un plan de vente au niveau tactique et programmation court terme de la production au niveau opérationnel) doivent être prises en intégrant les capacités des différents partenaires et en mesurant l'opportunité de faire, éventuellement, appel à des prestataires extérieurs à la Supply Chain en cas de besoin.

Parallèlement (et grâce) à l'adoption d'une vision Supply Chain, et toujours dans le but de faire face à la hausse de la concurrence, les entreprises ont modifié leurs pratiques commerciales. Ainsi, celles-ci ont par exemple diversifié leur portefeuille produits mais également raccourci la durée de vie de ces derniers. Ces actions, ayant pour objectif de se différencier vis-à-vis de la concurrence, ont eu pour conséquence de modifier, en retour, le comportement des consommateurs. Ainsi, ces derniers sont devenus de plus en plus avides de nouveautés et désireux de pouvoir personnaliser leurs achats. Par conséquent, le mode de fabrication usuel, d'un unique produit en grandes quantités dans le but de réaliser des économies d'échelles, a dû être abandonné. Plus précisément, dorénavant « l'efficacité de la production de masse doit être disponible pour une production différenciée » ([Gong, 2008]). Ceci n'a pu être réalisé que par l'introduction de flexibilité, cette notion correspondante à un ensemble de leviers permettant de répondre à des variations non prévues de l'environnement [Stevenson and Spring, 2007]. Ces leviers peuvent, par exemple, prendre la forme de réserves capacitaires (flexibilité volume) dans le but d'ajuster rapidement le volume de production à la demande réelle ou encore l'affectation de la fabrication d'un même produit à plusieurs usines dans le but de pouvoir adapter la charge à la capacité du système considéré par l'intermédiaire de transferts de quantités à produire (mix flexibilité) ([Sethi and Sethi, 1990], [Chandra et al., 2005]). Bien entendu, au-delà de la production, l'apport de flexibilité a également concerné les parties approvisionnement et distribution, ceci donnant naissance au concept de « Supply Chain Flexibility » (SCF) pouvant être définie comme « la capacité d'une Supply Chain et de ses partenaires à être réceptif à tout changement mineur ou majeur de leur environnement économique, à pouvoir estimer la situation réelle et à y répondre simplement par le biais de mesures correctrices, en peu de temps et à faible coût, tout en maintenant un bon niveau de performances » [More and Babu, 2009a]. Bien entendu cette notion de flexibilité et plus précisément de « Supply Chain Flexibility » a dû être considérée dans le cadre des différents sous-processus de planification (stratégique, tactique et opérationnel) afin de permettre sa bonne utilisation. Ainsi, lors de la planification stratégique, le dimensionnement de la flexibilité est devenu aussi important que celui des capacités et la prise en compte des coûts et de la performance [Adam et Swamidass, 1989]. Ceci est d'autant plus vrai que l'introduction de leviers de flexibilité présente un surcoût non négligeable qu'il convient d'analyser au regard des gains associés.

Au-delà de l'adoption d'une démarche Supply Chain et de la prise en compte de la flexibilité, les processus de planification stratégique, tactique et opérationnel ont dû intégrer une autre tendance issue de la modification des pratiques commerciales (i.e. la hausse de la diversité des produits). Celle-ci correspond à la notion de standardisation désignant le fait de fabriquer différents produits finis à partir de composants communs. Ceci a en effet pour conséquence de maintenir au même niveau, voir même de réduire, la quantité de semi-finis à fabriquer malgré la hausse de la diversité du portefeuille produit. Concrètement, cela offre la possibilité de réaliser des économies d'échelles par une production massifiée tout en maintenant une diversité élevée en termes de produits finis proposés [Fixson, 2007]. Cependant afin d'être pertinente une telle démarche doit être adressée dans le cadre des différents processus de planification. Ainsi, par exemple, dans le cadre stratégique, la fabrication des produits réalisés à partir de composants communs doit être affectée aux mêmes usines tandis qu'au niveau opérationnel leur production doit être réalisée simultanément.

Partant de la nécessité d'adapter les processus de planification (stratégique, tactique et opérationnel) au passage à une démarche Supply Chain ainsi qu'à la prise en compte de la flexibilité et de la standardisation, de nombreuses recherches ont été réalisées sur le sujet. Celles-ci ont eu pour objectif de définir des modèles et méthodes mais également des outils d'aide à la décision complets afin de permettre aux entreprises d'appréhender de la meilleure des façons ce nouvel environnement. Les travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat s'intègrent dans cette mouvance. Ceux-ci ont, tout d'abord, porté sur la planification stratégique mise en œuvre par la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la Société Michelin au sein de laquelle a été réalisée cette thèse CIFRE. Plus précisément, nous nous sommes intéressés au processus d'affectation stratégique des productions aux usines et de dimensionnement des ressources ainsi que de la flexibilité du système de production, le tout en considérant l'incertitude relative à la demande. Ainsi, l'objectif industriel associé à ce doctorat était la réalisation d'un outil d'aide à la décision dédié à ce processus, l'enjeu étant de garantir un bon niveau de satisfaction de la demande tout en maîtrisant les coûts associés et, ce, malgré l'incertitude pesant sur le niveau réel de la demande de chaque produit individuellement.

Cet objectif industriel a lui-même été étendu dans le cadre de nos activités de recherche afin de se ramener à une problématique théorique exprimée comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain. Celui-ci correspond au problème du choix, sur un horizon de plusieurs années, du lieu de fabrication (usine) des différents produits proposés par une Supply Chain dans le cadre d'une demande incertaine. A celui-ci sont adjointes différentes contraintes, en l'occurrence :

- (i) les capacités et capabilités techniques des différents moyens de production ;
- (ii) la standardisation produit ;
- (iii) le dimensionnement et la gestion des ressources ;
- (iv) la prise en compte d'une configuration initiale ;
- (v) l'incertitude relative au niveau réel de la demande de chaque produit individuellement.

Par gestion des ressources, au-delà de la prise en compte de leurs capacités, nous entendons le fait, lors de leur dimensionnement durant la planification stratégique, de considérer la possibilité de les faire transiter au niveau tactique entre les usines. Ceci permet, en effet, de limiter le nombre total à acquérir et constitue donc un levier d'optimisation supplémentaire des coûts de construction d'une Supply Chain. La prise en compte d'une configuration initiale correspond, quant à elle, à la nécessité lors de la planification stratégique de tenir compte de l'état existant de la Supply Chain, état ne pouvant être modifié que partiellement pour des raisons budgétaires. Dans ce contexte, l'objectif est de maximiser le profit du système exprimé comme la différence entre le chiffre d'affaire espéré et, d'une part, les coûts de construction (achat des ressources, modification de la configuration initiale) ainsi que, d'autre part, les coûts opérationnels espérés (coûts de stockage, coûts de transfert des ressources, coûts de production,...).

De par ces caractéristiques nos travaux de recherche se rattachent à la thématique du Supply Chain Network Design (SCND). Celle-ci correspond à l'ensemble des décisions ayant le plus d'impact sur le fonctionnement ainsi que la rentabilité d'une Supply Chain [Simchi-Levi et al., 2004] car traitant de l'intégralité de ses activités (approvisionnement, production, distribution...) [Lin and Wang, 2011]. Bien que le SCND ait fait l'objet d'un nombre important d'études, le problème théorique adressé dans le cadre de ce doctorat ne peut être résolu à l'aide de modèles et méthodes existants. En effet, la réalisation d'un état de l'art portant sur la littérature

relative au SCND, montre l'absence de prise en compte de contraintes et de paramètres importants. Ainsi, par exemple, la notion de transferts de ressources n'est jamais considérée comme un levier tactique à adresser lors de la planification stratégique afin de limiter l'ampleur des investissements à réaliser et, ce, alors même que de tels processus sont de plus en plus souvent mis en œuvre dans l'industrie (aéronautique, chantiers navals, automobile...). De plus, très peu de modèles considèrent simultanément différents paramètres effectivement rencontrés dans un contexte industriel, tels que les notions de flexibilité, de standardisation ou encore le dimensionnement des ressources. A ceci s'ajoute, la difficulté de trouver des méthodes existantes capables d'être utilisées dans un cadre réel ; les restrictions portant bien souvent sur la taille des problèmes pouvant être résolus. Partant de ces constats, nos travaux de recherche ont eu pour objectif de proposer différents modèles pour la résolution du problème ASPDRF dans un contexte incertain et, ce, même dans le cas d'instances industrielles réelles.

Au-delà, de ce problème théorique, les travaux de recherche présentés dans la suite de ce document ont également portés sur la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant, certes, l'horizon long terme mais également les horizons moyen et court terme. Il s'agit plus précisément de définir différentes méthodes permettant d'adresser des décisions relatives à la réalisation, au niveau stratégique, du Plan Industriel et Commercial (PIC), du Programme Directeur de Production (PDP) au niveau tactique ainsi que d'un plan de charge des machines de production au niveau opérationnel ; le tout en intégrant les boucles de faisabilités associées à la déclinaison des décisions d'un horizon sur l'autre. Ainsi, pour chacune de ces étapes, nous proposons un ensemble de méthodes basées sur la programmation linéaire et les modèles de flot.

Dans ce contexte, ce manuscrit de thèse est structuré en six chapitres.

Le premier chapitre est, naturellement, dédié à la présentation de la problématique considérée dans le cadre de ce doctorat. Ainsi, le problème industriel de planification stratégique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe du groupe Michelin ayant constitué le point de départ de nos travaux de recherche, est introduit dans un premier temps. Ensuite, une fois cet objectif industriel présenté, celui-ci est étendu afin de définir les deux objectifs de nos travaux de recherche, en l'occurrence la réalisation de modèles et méthodes pour le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain, d'une part, et la construction d'un environnement intégré de planification d'autre part. Ces travaux sont ensuite rattachés à une thématique de recherche, en l'occurrence le Supply Chain Network Design (SCND).

Le second chapitre est, quant à lui dédié, à la réalisation d'un état de l'art portant sur les différentes recherches relatives au SCND. Celui-ci n'a pas pour prétention d'établir une liste de la totalité des études menées sur le sujet mais plutôt de présenter d'une manière la plus exhaustive possible les différents axes de recherche étudiés. Ainsi, après avoir défini précisément la thématique de Supply Chain Network Design (SCND) et les décisions associées, nous nous intéressons aux premières recherches menées relativement à son sujet, à savoir celles faisant l'hypothèse d'un environnement déterministe. Aussi, nous étudions tour à tour les modèles de localisation d'entités (« Facility Location Problem »), de planification long terme et de dimensionnement capacitaire. Partant de ces travaux, nous nous intéressons, dans un second temps, aux articles de recherche traitant de ces mêmes problématiques dans un contexte incertain. Ainsi, outre la définition précise du concept d'incertitude et de la terminologie associée, nous étudions successivement les modèles stochastiques et robustes pour le SCND. Cette étude relative au SCND dans un contexte incertain est ensuite poursuivie par l'analyse des principales recherches menées relativement à la flexibilité. Sont ainsi référencées les articles majeurs relatifs à la définition et à la classification de la flexibilité, ceci servant de point de départ à l'étude des

différentes recherches portant sur son dimensionnement ainsi que des modèles et méthodes associées (modèles stochastiques, méthodes de simulation...). Outre l'aspect informatif, ce chapitre a également pour objectif de comparer les caractéristiques de nos travaux avec les problématiques déjà traitées au sein de la littérature. Autrement dit, il permet de mettre en évidence l'apport de nos travaux sur le plan théorique et de justifier leur réalisation.

Le troisième chapitre est quant à lui, compte tenu de l'opportunité de mettre en œuvre nos activités de recherche, dédié à la démarche de modélisation du problème ASPDRF dans un contexte déterministe. Sont ainsi proposés une formalisation mathématique et un programme linéaire mix en nombre entier (MILP) tandis que différents exemples numériques sont introduits afin, d'une part, d'illustrer les différents résultats obtenus et, d'autre part, de donner une idée des temps de résolution associés. Ces applications démontrent également l'impossibilité de résoudre des problèmes de grandes tailles à l'aide du MILP ainsi proposé, ce qui constitue l'un des objectifs de nos travaux de recherche.

Le quatrième chapitre présente une métaheuristique de type GRASP (« Greedy Randomized Algorithm with Search Procedure ») et, ce, en réponse à l'impossibilité de résoudre des problèmes de grandes tailles par le recours à la programmation linéaire. Outre les différents algorithmes associés, sont également introduites diverses applications numériques permettant d'illustrer le fonctionnement de ce GRASP, d'étudier la qualité des résultats obtenus et de mettre en évidence sa capacité à résoudre des problèmes réels complexes ; chose impossible par le recours à la programmation linéaire.

Dans le cinquième chapitre cette métaheuristique, ayant attiré uniquement au problème ASPDRF dans un contexte déterministe, est intégrée au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo afin de tenir compte de l'incertitude relative à la demande. Ainsi, outre les algorithmes associés, sont présentées différentes applications numériques permettant, d'une part, d'illustrer le fonctionnement du GRASP adapté afin de tenir compte de l'incertitude relative à la demande et, d'autre part, de démontrer sa capacité à résoudre des instances de grandes tailles pouvant être rencontrées dans l'industrie.

Le sixième chapitre, quant à lui, est dédié à la construction d'un environnement intégré de planification couvrant les horizons long, moyen et court termes. Ainsi, est tout d'abord proposé un schéma regroupant l'intégralité de ces horizons de planification dans un processus intégrant, d'une part, la déclinaison des décisions d'un niveau sur l'autre et, d'autre part, les boucles de faisabilité associées. Ces dernières établissent l'interaction des différents horizons de planification dans le but de permettre la remise en cause de décisions prises à un niveau (stratégique par exemple) en fonction des résultats obtenus par leurs déclinaisons au niveau inférieur (tactique par exemple). Partant de ce schéma est alors proposé un modèle linéaire mix en nombre entier (MILP) ainsi qu'un modèle de flot pour la résolution des problèmes stratégiques de définition des capacités, de déploiement capacitaire et de dimensionnement de la flexibilité. Ensuite, afin de décliner ces différentes décisions long terme au niveau moyen terme, un autre modèle de flot permettant d'établir au niveau tactique un Programme Directeur de Production (PDP) est construit. Celui-ci est suivi d'un MILP pour la réalisation au niveau opérationnel d'un plan de plan de charges des différents procédés de fabrication considérés et, ce, en fonction des décisions prises au niveau tactique ainsi que des prévisions de demande associées. Assez naturellement, à chacun des modèles développés est adjoint un ensemble d'applications numériques dans le but d'illustrer leur fonctionnement ainsi que leur capacité à résoudre des problèmes de grandes tailles.

Partant des différents travaux présentés, la dernière partie de ce manuscrit de thèse est, assez logiquement, constituée d'une conclusion au cours de laquelle sont préconisées différentes perspectives d'évolution.

Afin de faciliter sa lecture et l'enchaînement des parties le constituant, un synoptique de ce manuscrit de thèse peut être retrouvé sur la Figure i.

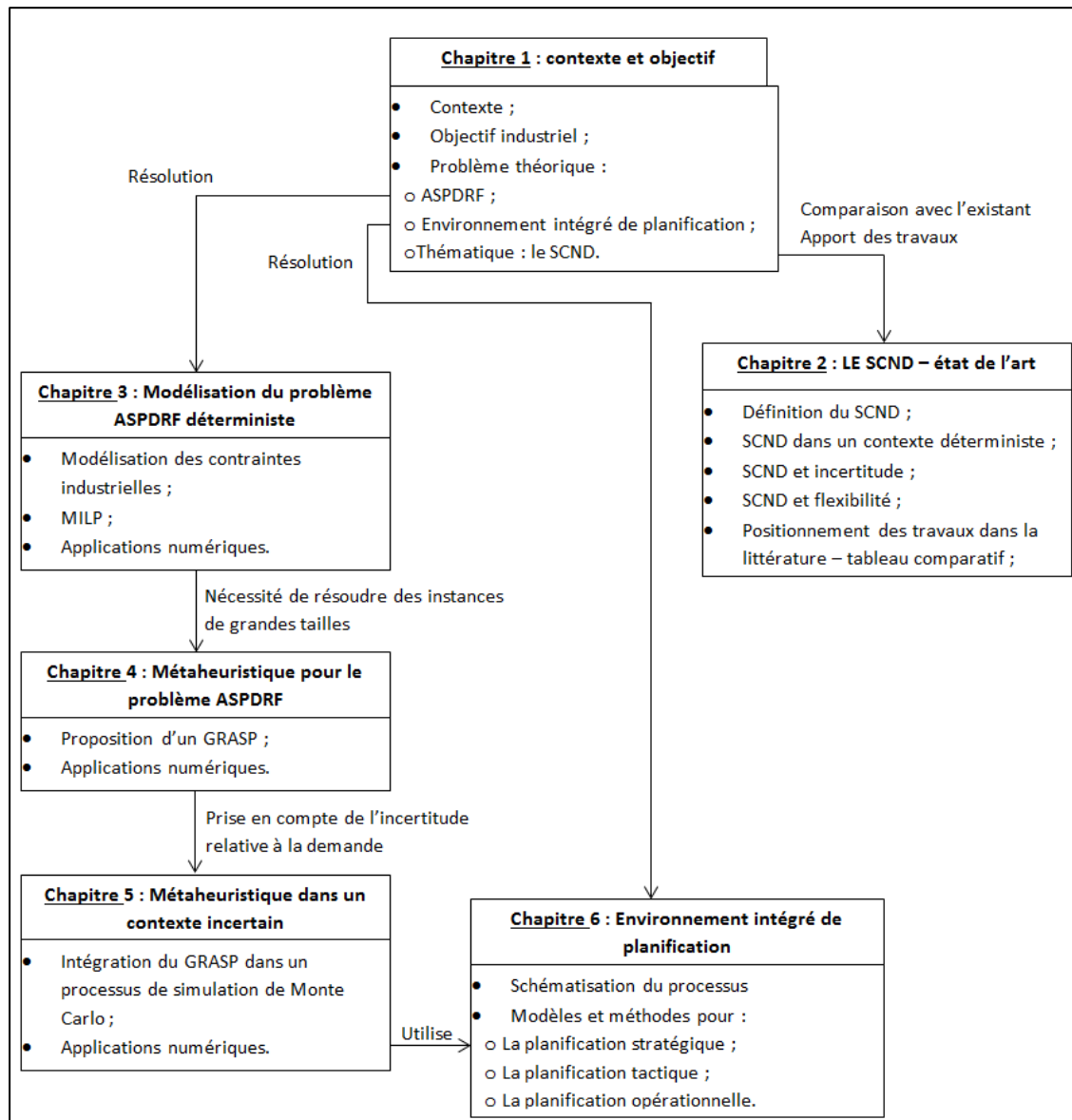


Figure i : Structure du manuscrit de thèse

Chapitre I : Contexte et problématique

Ce chapitre a pour objectif de définir la problématique adressée dans le cadre de ce doctorat. Il débute ainsi par une présentation du contexte associé à nos travaux de recherche, à savoir celui de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe du groupe Michelin. Partant de la problématique d'affectation long terme des productions aux usines connue par cette dernière, le problème théorique considéré est défini. Celui-ci est formulé comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDFR) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain. De par ses spécificités, ce dernier est rattaché à une thématique générale de recherche en l'occurrence le Supply Chain Network Design (SCND).

Sommaire

Chapitre I : Contexte et problématique	7
1. Introduction	9
2. Contexte	9
2.1. Limos	9
2.2. Michelin	10
3. Problématique	12
3.1. La notion de la Supply Chain	12
3.1.1. Définition d'une Supply Chain	12
3.1.2. Le cas spécifique de la Supply Chain Michelin	13
3.2. La prise de décisions au sein d'une Supply Chain : un processus hiérarchisé	14
3.2.1. Les différents niveaux de planification	14
3.2.2. La planification stratégique dans le contexte Michelin	17
3.3. Standardisation et familles de planification	18
3.4. Les contraintes de production	24
3.5. Les contraintes de ressources	26
3.6. Prise en compte d'un état initial	27
3.7. Prise en compte de l'incertitude	28
3.7.1. Incertitude et robustesse	28
3.7.2. Dimensionnement de la flexibilité	29
3.8. Objectif industriel	30
4. Travaux de recherche	31
4.1. Une extension du problème industriel	31
4.1.1. Premier objectif de la thèse : modèle d'affectation et de dimensionnement stratégique	31
4.1.2. Réalisation d'un environnement intégré de planification	33
4.2. Une thématique de recherche : le Supply Chain Network Design	34
5. Conclusion	35

Liste des figures

Figure 1 : Organisation des activités du groupe Michelin (www.michelin.com/corporate/FR)	11
Figure 2 : Contexte de la thèse – le service ingénierie Supply Chain TCE Michelin	11
Figure 3 : Segmentation Amont / Aval des activités du groupe Michelin	14
Figure 4 : Matrice de décisions au sein d'une chaîne logistique [Gruat La Forme-Chretien, 2007]	16
Figure 5 : Les notations sur un pneumatique	18
Figure 6 : Les dimensions d'un pneumatique	19
Figure 7 : Fréquence de mise en production des produits dans un cas standardisé et non standardisé [Kemmo et al., 2012]	21
Figure 8 : comparaison des stocks périodiques dans le cas d'un portefeuille produit standardisé et d'un autre non standardisé [Kemmo et al., 2012]	21
Figure 9 : Carcasse	22
Figure 10 : Bandage	22
Figure 11 : Etapes de production et différenciation des produits	23
Figure 12 : Premier profil de production	25
Figure 13 : Second profil de production	25
Figure 14 : Schéma générique d'une usine	26
Figure 15 : Schématisation d'une usine en ligne de production lignes de production	26

Liste des tableaux

Tableau 1 : Segmentation des indices de charges et de vitesse	19
---	----

1. Introduction

Un doctorat ne constitue pas une étape clairement définie et balisée. En effet, un tel travail peut revêtir différents aspects, tant par le sujet adressé que par l'environnement dans lequel il se déroule. Par conséquent, il est indispensable, afin d'être à même d'appréhender le travail réalisé, de connaître et comprendre ces différents paramètres ; cet aspect constituant l'objectif premier de ce chapitre.

Ainsi, dans les paragraphes suivants, seront introduites les deux entités au sein desquelles ont été réalisés ces travaux de recherche, en l'occurrence le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) de Clermont-Ferrand et la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin. Au-delà de leur présentation, nous nous intéresserons à la problématique d'affectation long terme des productions aux usines connue par cette dernière. En effet, celle-ci a constitué un prélude aux travaux réalisés durant ce doctorat. Cependant, étant très spécifique, elle a été enrichie afin de se ramener à un problème plus théorique de planification stratégique d'une Supply Chain constituant une partie des activités de recherche réalisées. Au-delà de cette présentation du sujet, nous soulignerons l'appartenance de nos travaux à la thématique plus large du Supply Chain Network Design (SCND)([Lin and Wang, 2011]) et, ce, alors même que sera défini l'un des objectifs annexe de nos travaux en l'occurrence la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant, certes l'horizon long terme, mais également ceux qualifiés de moyen et court terme.

Compte tenu de ces éléments, ce chapitre débute par une présentation du contexte dans lequel a été effectuée la thèse. Ceci facilitera l'introduction, dans une troisième partie, de la problématique de planification de la société Michelin considérée puis son extension à un problème théorique de Supply Chain Network Design au cours de la quatrième. De plus, cette dernière section sera également constituée d'une présentation de l'environnement intégré de planification dont la réalisation constitue le second objectif de ces travaux de doctorat.

2. Contexte

La thèse, présentée dans ce document, a fait l'objet d'un contrat CIFRE. A ce titre, elle a été réalisée dans un milieu industriel en collaboration avec un laboratoire de recherche ; à savoir respectivement l'entreprise Michelin ainsi que le Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) dont une courte présentation est réalisée au sein de la partie suivante.

2.1. Limos

Le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) est un laboratoire Clermontois dépendant du CNRS. Celui-ci a pour vocation d'étudier et optimiser l'impact des décisions humaines sur son environnement. Ainsi, il adresse aussi bien des thématiques telles que l'optimisation de systèmes statiques et dynamiques, le traitement et l'analyse des données, l'évaluation des performances d'un système ainsi que de son évolution ou encore des aspects liés au stockage et au partage de l'information. Afin de mener à bien cette diversité de recherches, celui-ci est structuré en 3 axes intitulés respectivement « Modèles et Algorithmes de l'Aide à la Décisions (MAAD) », « Systèmes d'information et de communication

(SIC) » et « Systèmes de production (SP) » au sein duquel ont été effectués les travaux de recherches faisant l'objet de ce document.

Comme mentionné précédemment, le doctorat présenté dans ce manuscrit a fait l'objet d'un contrat CIFRE. A ce titre, au-delà du LIMOS, il a également été réalisé au sein d'une entreprise, à savoir la société Michelin dont une présentation est donnée dans la partie suivante.

2.2. Michelin

Le groupe Michelin est un manufacturier pneumatique de premier plan présent dans le monde entier, tant par l'implantation de ses unités de production (69 sites répartis dans 18 pays) que par celle de ses clients (présence commerciale dans plus de 170 pays). Au-delà de cette répartition géographique, la nature même des marchés adressés est relativement diversifiée. En effet, le portefeuille produits de ce groupe n'est pas seulement constitué de pneumatiques à destination des véhicules de tourisme ainsi que camionnette et 4x4 mais également de produits spécifiques pour les camions, avions, machines agricoles et de Génie civil ainsi que les véhicules à deux roues (motos, scooter, vélos). De plus, au-delà de la production de pneumatiques sous différentes marques, le groupe est également connu pour ses cartes et guides ainsi que pour ses produits dérivés (vêtements, horloges,...). Notons également que Michelin est sur un type de marché « business-to-business » c'est-à-dire que ses clients ne sont pas les consommateurs finaux mais les revendeurs et garagistes indépendants ainsi que les fabricants automobiles ; ce dernier cas correspondant aux pneus achetés afin d'équiper les véhicules neufs. A ce propos, remarquons que ce groupe possède également ses propres canaux de distribution, à savoir Euromaster en Europe et TYRE PLUS ainsi que TCI aux Etats-Unis, dans lesquels peuvent se rendre les consommateurs finaux.

Cette diversité de produits proposés, de marchés adressés ainsi que de zones géographiques desservies suppose une organisation spécifique afin de garantir la réussite et la pérennité du groupe Michelin. Ainsi, au sein de celui-ci, les activités sont réparties en 8 « lignes produit » selon la nature des produits proposés. Plus précisément, comme illustré sur la Figure 1, sont distinguées les lignes produits Poids Lourds, Deux Roues, Avion, Génie Civil, Agricole, Tourisme Camionnette, Matériaux, ainsi que celle regroupant les produits complémentaires telles que les cartes et guides ou encore les produits dérivés. Précisons que la ligne produit Matériaux constitue une entité support puisqu'elle est responsable de la production et du bon approvisionnement en matières premières de l'ensemble du groupe. Notons également que les activités de chacune de ces « lignes produit » sont elles-mêmes décomposées en différentes sous-entités selon les pays adressés. Sont donc distinguées 8 zones géographiques (Europe, Amérique du Nord, Amérique du Sud, Afrique ainsi qu'Inde et Moyen Orient, Europe Orientale, Chine, Japon et Corée, Asie du Sud-Est et Australie). Chacune d'elles est responsable des ventes au sein de son territoire ainsi que de la gestion des unités de production la composant. Naturellement, au sein des « lignes produit », ces sous-entités géographiques résultantes ne sont pas indépendantes les unes des autres mais communiquent entre elles en fonction des besoins du marché. De plus, pour chaque lignes produits, chacune de ces zones géographiques est-elle même décomposée en différentes unités fonctionnelles responsables de périmètres clairement établis ; périmètres à l'origine de leur nom. Ainsi, sont distinguées les unités en charge des aspects industriels, celle responsable des activités commerciales ou encore la Supply Chain. Parallèlement à ce découpage, se trouvent également 5 centres de technologies, chargés de l'aspect recherche et développement, répartis en France, aux Etats-Unis ainsi qu'au Japon.

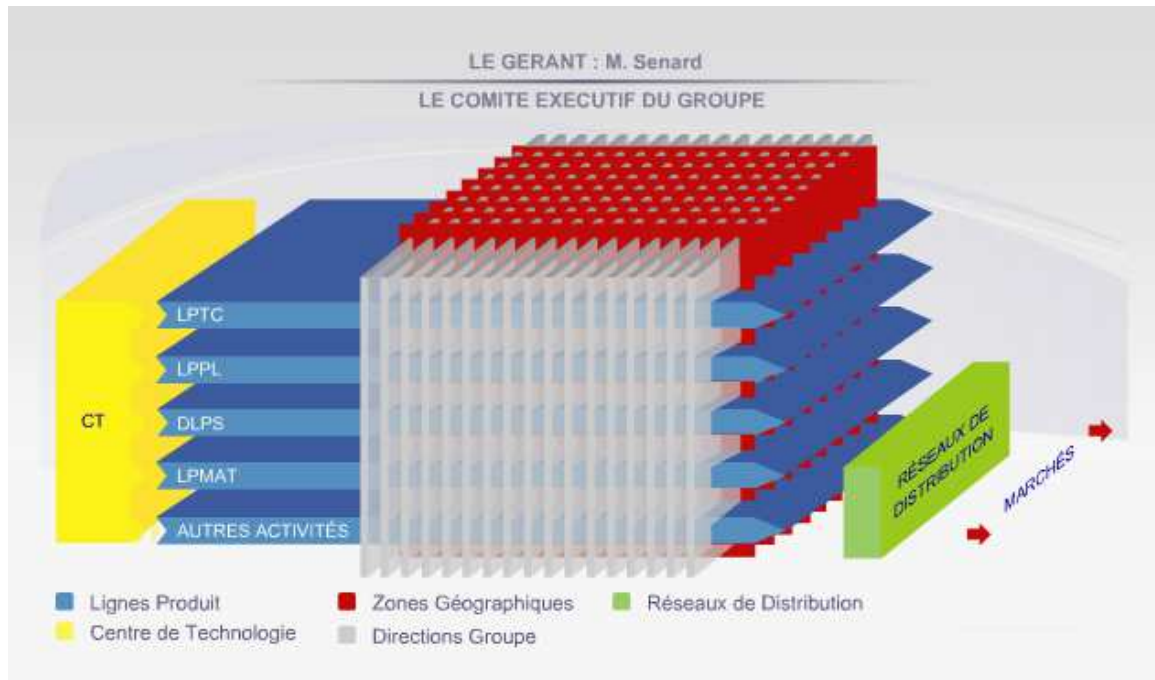


Figure 1 : Organisation des activités du groupe Michelin (www.michelin.com/corporate/FR)

La thèse faisant l'objet de ce document a été effectuée au sein de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe (TCE) du groupe Michelin. Cette entité est responsable des activités de production et de distribution des produits finis tourisme, camionnette et 4x4, dans l'ensemble de l'Europe. Conformément à ce qui a été précédemment mentionné, celle-ci est composée de différents services propres dont le service ingénierie Supply Chain, où ont été réalisés les travaux présentés dans ce manuscrit. Celui-ci, dont la place au sein de l'organigramme Michelin est illustrée sur la Figure 2, est responsable de l'évolution des différents processus inhérents à la Supply Chain, c'est-à-dire de l'identification de voies d'améliorations et de leur mise en œuvre. Il est ainsi lui-même divisé en différents champs de compétences selon les domaines adressés tels que la planification de la production, la distribution ou encore la prévision de la demande.

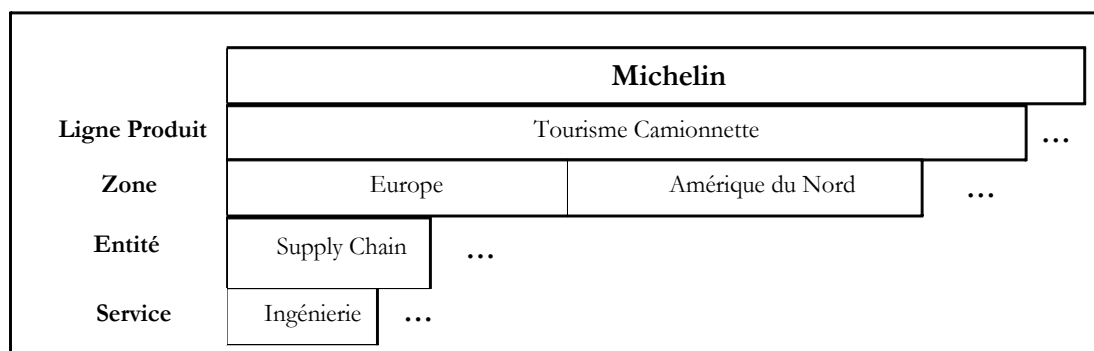


Figure 2 : Contexte de la thèse – le service ingénierie Supply Chain TCE Michelin

De par ses prérogatives, la Supply Chain Michelin TCE doit gérer un portefeuille de plus de 4000 produits, dont la fabrication est réalisée au sein d'une quinzaine d'usines réparties en Europe afin d'alimenter un ensemble d'entrepôts ainsi que des milliers de client. Cette complexité nécessite, comme dans toute entreprise, la mise en place de processus de pilotage clairement établis tels que ceux relatifs à la planification ; domaine adressé dans le cadre de ces travaux de thèse.

3. Problématique

3.1. La notion de la Supply Chain

3.1.1. Définition d'une Supply Chain

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, de nombreux changements économiques sont intervenus ; ceux-ci étant souvent désignés sous le terme de « mondialisation des échanges ». Une de leur principale conséquence a été l'augmentation de la concurrence entre les entreprises, celles-ci n'ayant plus un marché géographique propre et protégé mais pouvant potentiellement vendre leurs produits et offrir leurs services dans le monde entier. Ainsi, afin d'être plus compétitives, elles ont dû renforcer leurs liens avec leurs différents fournisseurs et clients par le biais, notamment, de contrats privilégiés. Ce mouvement d'intégration des différents partenaires a provoqué l'apparition de ce qui est communément appelé une chaîne logistique ou encore une Supply Chain. Ce dernier terme fait l'objet d'un nombre important de définitions au sein de la littérature scientifique; une acceptation assez générale étant celle proposée par [Beamon, 1998] à savoir « un processus intégré au sein duquel interviennent un certain nombre d'entités (i.e fournisseurs, fabricants, distributeurs et revendeurs) travaillant ensemble afin d'acquérir des matières premières, convertir ces matières premières en produits finis et livrer ces produits finis aux revendeurs ». Notons que cette définition sous-entend deux approches différentes pouvant être retrouvées au sein de la littérature scientifique. La première correspond à la modélisation d'une Supply Chain par les flux. Ainsi, de nombreux chercheurs s'accordent pour considérer qu'un tel système est au moins parcouru par deux flux à savoir un flux physique et un flux informationnel ([Forrester, 1961], [Christopher, 1992], [Frazelle, 2001], [Stadler and Kilger, 2001]). Comme son nom l'indique, le flux physique est associé à l'ensemble des processus liés à l'achat des matières premières, à leur transformation et à leur livraison, dont l'optimisation s'inscrit dans une logique de satisfaction client. Le flux informationnel, quant à lui, correspond, entre autre, à la gestion de l'ensemble des données relatives à la demande, à l'état des moyens de production et de transport ou encore aux durées de la réalisation des différentes activités du système considéré. A ce titre, il est indispensable afin de coordonner les différents éléments du flux physique.

En plus des deux précédents, un certain nombre de chercheurs ont introduit un troisième flux à savoir le flux financier ([Tixier et al., 1979], [Lapide, 2000], [Samii, 2001]). Celui-ci constitue le pendant monétaire du flux physique. Il traduit d'une part (i) la disponibilité financière court terme de l'entreprise (cash-flow), d'autre part (ii) sa politique de crédit moyen terme ainsi que (iii) les objectifs de rentabilité long terme des actionnaires [Lysons and Gillingham, 2003]. Notons que tout comme le flux physique, sa bonne gestion nécessite également la disponibilité d'un flux informationnel de bonne qualité.

Parallèlement à cette approche par les flux, d'autres auteurs en ont adoptés une seconde basée sur les entités. Celle-ci consiste à considérer une Supply Chain comme un « système constitué d'au moins deux entités légales différentes, reliées entre elles par des flux matériels, informationnels et financiers » [Stadler and Kilger, 2001]. Cette vision s'est accompagnée de la séparation des entités d'une Supply Chain en deux canaux, à savoir le canal transactionnel et le canal logistique ([Bowersox et al., 1980], [Bowersox and Closs, 1996], [Croom et al., 2000] [Filser, 2000], [Lysons and Gillingham, 2003], [Tan, 2001]...). Le premier correspond à l'ensemble des entités physiques organisant la vente des produits entre les différents acteurs, tandis que le second est constitué de celles en charge de la distribution (prestataires logistiques...).

Notons que la définition proposée par [Stadler and Kilger, 2001], mentionnée dans le paragraphe précédent, fait l'hypothèse du caractère inter-entreprise d'une Supply Chain. Or, dans bien des cas, les entités constituant un tel système appartiennent à une même et unique société. Ainsi, Colin a proposé les concepts de Supply Chain interne et de Supply Chain externe ([Colin, 2004]). Une Supply Chain interne est ainsi définie comme le regroupement des différents acteurs d'une même entreprise dans un processus intégré de décision, établissant des contrats informels (ou formels) client-fournisseur et, ceci, dans le but de mettre en œuvre un service orienté vers la satisfaction du client. Un tel système présente l'avantage d'impliquer les différents intervenants d'une même société et par conséquent « d'améliorer la position de l'entreprise sur son marché » ([Colin, 2004]). Dans ce contexte, la Supply Chain externe apparaît alors comme une somme de Supply Chain interne. Remarquons qu'une telle définition élude la question de l'influence des différents acteurs d'un tel système. Aussi, ce même auteur précise cette définition en indiquant qu'en réalité la notion de Supply Chain externe correspond bien souvent au regroupement d'un ensemble d'entités légales différentes autour de la Supply Chain interne d'une entreprise pivot « qui de par sa position dominante dispose...d'un pouvoir de changement ». Cette définition est similaire à celle donnée dans [Lee et al., 2007] relativement à la Supply Chain d'une société multinationale. Ainsi, dans cet article, les auteurs indiquent que dans ce cas la Supply Chain correspond au regroupement d'un ensemble de filiales d'une entreprise multinationale auxquelles s'ajoutent des sociétés « satellitaires » tels que des prestataires logistique ou encore des fournisseurs de matière première.

Notons que ce passage d'une vision individualiste à une intégration des partenaires au sein d'une Supply Chain a nécessité un profond changement de mentalité de la part des chefs d'entreprises. En effet, il ne s'agit pas pour eux de réaliser des économies au dépend de leurs partenaires mais d'améliorer le profit de l'ensemble du système afin au final d'assurer sa pérennité [Croom et al., 2000]. Cette nécessaire mutation a d'ailleurs été soulignée par les industriels eux-mêmes, tout comme l'indique les propos tenus par John Gossman, vice-président de Allied Signal, en 1997 et rapportés dans [Vickery et al., 1999], à savoir le fait que la concurrence n'a plus lieu entre entreprises mais entre Supply Chain. Dans ce contexte, comme indiqué précédemment, la société Michelin a elle-aussi logiquement adoptée une vision Supply Chain pour ses différentes activités.

3.1.2. Le cas spécifique de la Supply Chain Michelin

Au-delà des définitions théoriques données au sein de la partie précédente, l'adoption d'une approche Supply Chain par les entreprises se fait d'une manière différente selon leur secteur d'activité ainsi que leur taille. Ainsi, dans le cas de l'entité Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, la Supply Chain porte uniquement sur la production ainsi que la distribution des produits finis et ne comprend pas la partie approvisionnement en matières premières et semi-finis. Ceci provient du découpage particulier des activités du groupe Michelin en différentes lignes produits ; celle nommée « matériaux » étant chargée de la production des matières premières et produits semi-finis ainsi que de l'approvisionnement de l'ensemble des autres. Ainsi, comme illustré sur la Figure 3, les activités du groupe Michelin peuvent être divisées en une partie Amont et une partie Aval. Notons que ce découpage répond à deux aspects particuliers. Le premier correspond au partage de mêmes composants entre les différentes lignes produits, rendant d'autant plus efficace la livraison de ces dernières à partir d'une même et unique entité centralisant les différentes demandes. Le second provient de l'importance du portefeuille produit (plusieurs milliers d'éléments) de ces mêmes lignes produits. Par exemple, dans le cas de TCE, celui-ci est composé de plus de quatre milles produits finis eux-mêmes constitués de plusieurs composants. Ainsi, afin de permettre une meilleure gestion de la complexité résultante, il est nécessaire de découpler les activités de production et distribution d'une part et

approvisionnement en matières premières d'autres parts. A titre informatif, soulignons que la Supply Chain de la ligne produit « Matériaux » est composée, en partie, d'usines propres au groupe Michelin. Ces dernières sont par exemple chargées de la production de mélanges ou encore de matériaux métalliques à partir de matières premières achetées à des fournisseurs externes.

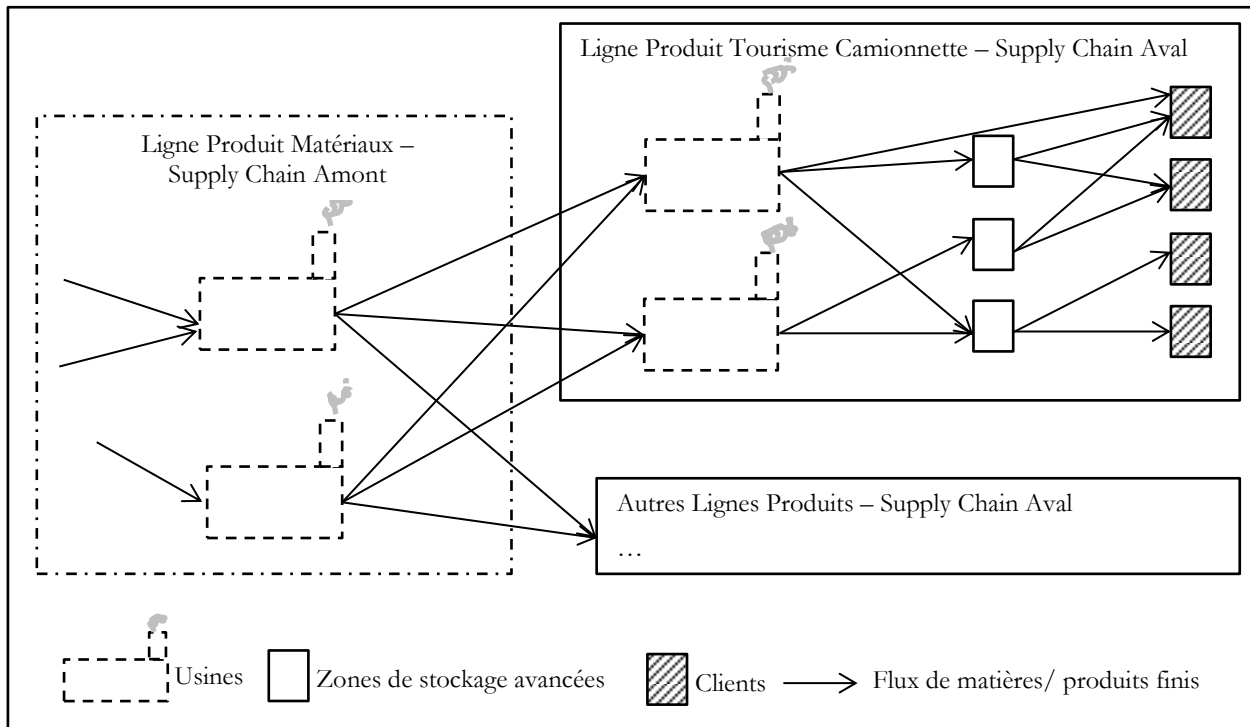


Figure 3 :Segmentation Amont / Aval des activités du groupe Michelin

Dans ce contexte du passage d'une vision individualiste à une vision Supply Chain, les différents processus de pilotage ont pris une importance considérable. En effet, de par la multiplication des acteurs concernés et afin de permettre des prises de décisions concertées, ils doivent être clairement établis et mis en œuvre à une fréquence précisément définie. Ceci a ainsi nécessité l'adaptation de ceux initialement réalisés individuellement au sein de chaque entreprise, dont notamment le processus de planification faisant l'objet de la partie suivante.

3.2. La prise de décisions au sein d'une Supply Chain : un processus hiérarchisé

3.2.1. Les différents niveaux de planification

Afin d'assurer une bonne gestion de ses activités, tout système se doit de mettre en œuvre des processus de pilotage et de prise de décision adéquats et clairement établis. Ceci est également le cas des Supply Chain au sein desquelles sont, notamment, réalisées des activités de planification. Celles-ci peuvent être décomposées en trois selon l'horizon de temps considéré, à savoir les planification stratégique, tactique et opérationnelle ([Anthony, 1965]; [Fleischmann et al., 2002]; [Bertrand, 2003]; [Manzani and Gamberini, 2008]). A chacune de ces dernières correspond un ensemble de décisions spécifiques comme indiqué ci-dessous.

Planification stratégique : ce processus consiste à prendre des décisions long terme (i.e pour des horizons allant de 5 à 10 ans) dont l'impact sur le système considéré se mesure pendant de nombreuses années [Simchi-Levi et al., 2004]. Celles-ci concernent notamment le nombre, la localisation, le dimensionnement des différentes entités et usines ainsi que l'établissement des liens entre elles, ou encore la définition et la localisation des produits.

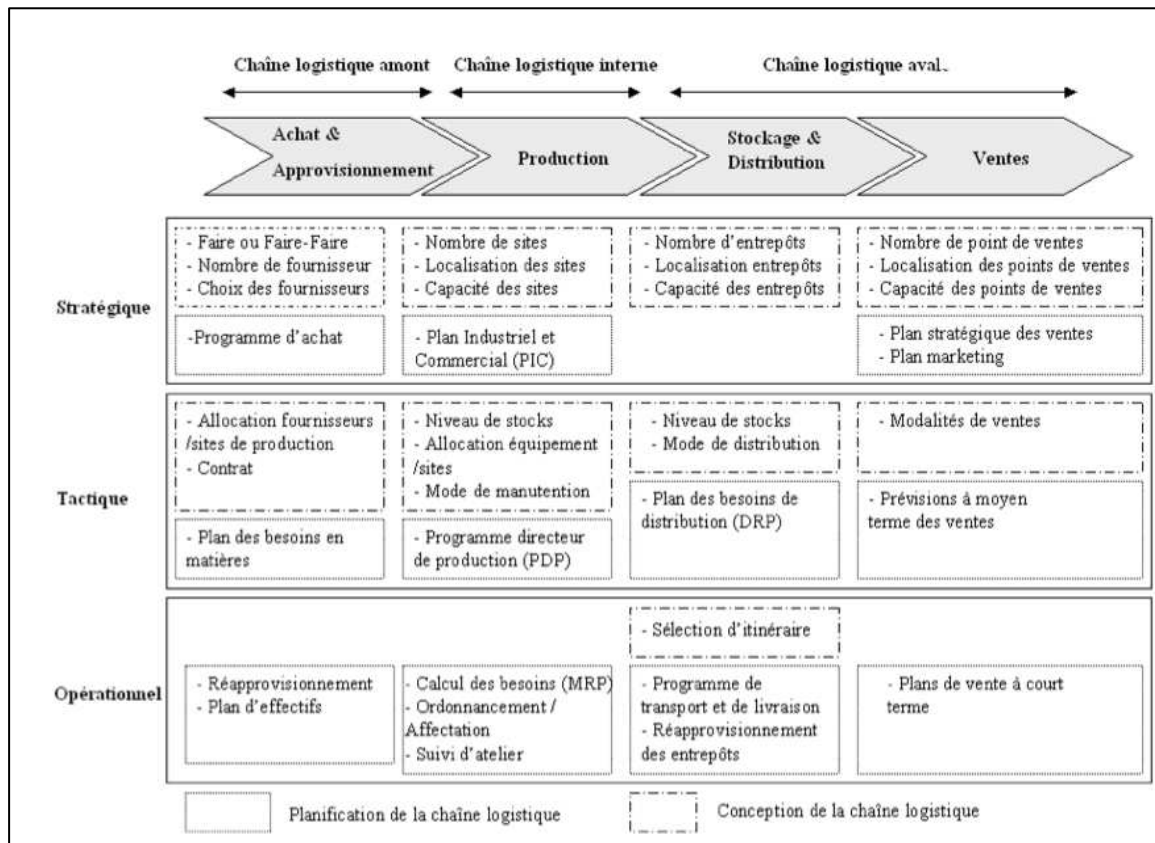
Planification tactique : dans le cadre des décisions prises au niveau stratégique et en intégrant les nouvelles données marché, la planification tactique a pour objectif de piloter les activités de la Supply Chain à moyen terme (i.e pour des horizons allant de 6 à 18 mois) afin de satisfaire au mieux la demande à coût minimum. Ceci passe par l'établissement de plans de production à une maille agrégée (mois, semaines), la définition du niveau des stocks de sécurité ou encore la mise en œuvre de vecteurs de capacités supplémentaires (recours à des heures supplémentaires, à de la main d'œuvre temporaire,..) ;

Planification opérationnelle : ce processus court terme (1-3 mois) consiste à piloter les activités quotidiennes. Ainsi, dans ce cadre sont réalisés des plans détaillés des différentes activités de production (affectation des ressources aux machines, définition des tailles de lots,...).

Ces différentes propositions mettent en exergue un élément important à savoir les liens existant entre les différents horizons de planification. Ainsi, par exemple, les décisions prises au niveau stratégique à la maille famille de produits, seront plusieurs mois ou années plus tard reconsidérées dans le cadre tactique. Elles seront alors déclinées à une maille plus fine (produits finis) et éventuellement légèrement modifiées en fonction des nouvelles prévisions et données du marché. Ainsi, il existe une notion de hiérarchisation de ces différents processus, correspondant tant à un aspect temporel que décisionnel. Cet aspect est mis en exergue sur la Figure 4 issue de [Gruat La Forme-Chretien, 2007]. Celle-ci reprend les principales décisions relatives aux différents horizons de planification tout en les hiérarchisant selon le type d'activités de la Supply Chain considéré (distribution, production,...). De plus, sont distingués les aspects liés à la conception de la Supply Chain et ceux relatifs à la planification de ses activités. Par exemple, comme mentionné dans les propositions précédentes, les décisions stratégiques liées à la production concernent principalement la détermination du nombre de sites, leur localisation, leur dimensionnement capacitaire ainsi que la réalisation du Plan Industriel et Commercial (PIC). Celui-ci peut être défini comme un processus permettant de « déterminer les quantités globales par famille de produits à fabriquer, (...) à partir des capacités financières de l'entreprise et d'investissement, de la demande du marché, des objectifs de vente de l'entreprise, des niveaux de stocks souhaités et des capacités de production » [Thomas, 2003]. Notons qu'au sein de la littérature, il n'y a pas unanimité sur le caractère stratégique du PIC. Plus précisément, selon le type d'industrie considéré et de la facilité avec laquelle peuvent être remises en cause les décisions d'investissements, ce processus peut également être mis en œuvre à un horizon tactique. Cependant, dans le cadre de nos travaux, nous le considérons d'avantage comme un processus long terme engageant les activités futures de la Supply Chain considérée. Ce Plan Industriel et Commercial est ensuite traduit, au niveau tactique, en un Plan Directeur de Production (PDP). Le PDP constitue une sorte de concrétisation du PIC puisqu'il consiste notamment à décliner les décisions prises à une maille agrégée (famille de produits / agrégat produits) à la maille produit fini. De plus, il représente la première étape de validation des éléments décidés au niveau stratégique. En effet, cette phase implique le calcul d'un besoin plus précis en termes de ressources ; calcul pouvant mettre en évidence des inadéquations entre charges et capacités nécessitant une remise en cause du PIC. Ainsi, le PDP « se trouve au cœur des tensions engendrées par les perturbations susceptibles de survenir, tels les retards de production, ou dans son environnement telles les modifications de la demande » [Tchernev, 2003]. Notons, que la

réalisation du PDP s'appuie également sur d'autres décisions prises au niveau tactique telles que la définition des normes de stocks ou encore l'affectation des ressources aux sites de production. Toujours dans le domaine de la production, le PDP est ensuite utilisé au niveau opérationnel afin de déterminer les quantités exactes de chaque composant et semi-fini à acheter ou produire et, ceci, selon une démarche de type MRP (Material Requirement Planning). Cette approche consiste à partir des quantités de chaque produit fini à fabriquer, des nomenclatures associées ainsi que de l'état des stocks à définir exactement le nombre de chaque composant à produire ou acheter. Cette phase opérationnelle est également complétée de la réalisation d'un ordonnancement des tâches correspondantes sur les différentes machines au sein des ateliers.

Figure 4 : Matrice de décisions au sein d'une chaîne logistique [Gruat La Forme-Chretien, 2007]



De par les éléments décrits au sein de ce paragraphe, il est aisé de se rendre compte de l'importance que revêt la planification stratégique. Celle-ci a pour but de définir et mettre en œuvre les conditions du bon fonctionnement du système considéré dans le futur, c'est-à-dire de garantir son profit à long terme. Bien entendu, ce processus décisionnel est adapté au sein de chaque Supply Chain en fonction de leurs caractéristiques et du découpage des différentes activités. Ainsi, dans le cadre de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, la planification stratégique est réalisée d'une manière spécifique présentée au sein de la partie suivante.

3.2.2. La planification stratégique dans le contexte Michelin

Conformément aux éléments introduits précédemment, beaucoup de décisions sont à considérer dans le cadre de la planification stratégique. Celles-ci ne sont pas toujours prises simultanément. Ainsi, dans le cadre de la Supply Chain Michelin TCE, l'affectation long terme des productions, consistant à déterminer dans quelle(s) usine(s) seront fabriqués les différents produits sur plusieurs années, n'est pas directement couplée avec la définition des investissements capacitaires. Cependant, ces deux types de décisions sont étroitement liés. Ainsi, l'affectation des productions permet d'établir un premier équilibre charge-capacité, du système de production de la Supply Chain considéré, en fonction duquel sont décidés les éventuels investissements capacitaires. A son tour, la détermination des nouvelles capacités nécessitera une réactualisation des affectations précédemment décidées afin d'aboutir à un système de production le plus équilibré possible.

Malgré leurs liens étroits, les décisions stratégiques ne sont pas prises par une même et unique personne ; ceci étant impossible compte tenu du volume de paramètres à considérer. Ainsi, le processus d'affectation long terme des productions, constituant le sujet industriel de ces travaux de thèse, est réalisé spécifiquement par le responsable de la planification stratégique de l'entité Supply Chain TCE. Ce dernier l'effectue annuellement; des ajustements mineurs étant ensuite apportés mensuellement. Ces changements correspondent, par exemple, à l'ajout de nouveaux produits au catalogue commercial ou encore à la modification de contrats avec des constructeurs automobiles ; ce dernier cas correspondant aux pneumatiques équipant les voitures neuves à leur sortie d'usine. Comme illustré dans la suite de ce document, outre la définition du lieu de fabrication des différents produits sur plusieurs années, le processus d'affectation long terme des productions consiste à déterminer le dimensionnement de certaines ressources ainsi que de la flexibilité dont doit être dotée le système de production. Notons que, compte tenu de leur caractère long terme, ces décisions sont prises à une maille annuelle c'est-à-dire pour chaque année de l'horizon considéré.

Conformément à l'importance que revêt la planification stratégique, l'enjeu lié à ce processus d'affectation est très élevé. En effet, de par sa fonction première, celui-ci a de fortes conséquences sur la capacité du système à satisfaire la demande future à moindre coût. Plus précisément, si les configurations proposées conduisent à des problèmes tels que des déséquilibres charges – capacités, des mesures devront être prises dans le cadre de la planification tactique. Celles-ci correspondent par exemple à la modification de l'affectation des produits aux usines. Or, outre le fait qu'elles ne permettent pas toujours de satisfaire la totalité de la demande, ces actions sont relativement coûteuses et longues à mettre en œuvre. De plus, elles tendent à désorganiser l'intégralité de la Supply Chain, de par une modification des flux des matières premières mais également des trajets de distribution des produits finis. Le fort impact, sur le fonctionnement de la Supply Chain, de ce processus d'affectation des productions aux usines, provient également des différentes activités connexes dont il est le support. Ainsi, comme indiqué précédemment, il permet d'effectuer des analyses d'équilibre charges - capacités long terme motivant et justifiant des éventuels investissements mais, également, d'anticiper les nécessaires modifications de certains moyens de production en fonction des lieux de fabrication futurs des produits (cas des nouveaux produits affectés à des moyens industriels non totalement adaptés à leur fabrication).

De par l'horizon de temps considéré, à savoir 5 ans, les décisions d'affectation long terme ne sont pas prises en considérant les produits finis mais un regroupement de ces derniers en différents agrégats ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

3.3. Standardisation et familles de planification

La planification stratégique a pour vocation de prendre des décisions relatives à un horizon de temps relativement important. Plus précisément, dans ce cadre, ne sont pas considérés les éléments en tant que tels mais des regroupements de ces derniers. Ceci est par exemple le cas des produits finis qui sont regroupés au sein de différents groupes désignés par la suite sous le terme « *agrégat produits* ». Dans ce contexte, l'affectation des productions consiste, non pas, à déterminer les lieux de fabrication futurs des produits finis individuellement mais de chacun des différents agrégats produits ; agrégats produits dont la composition doit par conséquent répondre à deux conditions indispensables. Tout d'abord, ils doivent être cohérents d'un point de vue commercial afin de permettre l'obtention de prévisions de demande long terme de bonne qualité. De plus, il est primordial qu'ils regroupent exclusivement des produits techniquement similaires, c'est-à-dire pouvant être fabriqués sur les mêmes moyens de production. En effet, dans le cas contraire, la prise de décision à la maille agrégat produit conduirait à l'affectation de produits à des moyens de production n'ayant pas les caractéristiques techniques suffisantes pour les fabriquer.

Afin de bien comprendre la façon avec laquelle ont été constitués ces agrégats produits dans le cadre de l'affectation de la production de la Supply Chain Michelin TCE, il convient de s'intéresser à la description d'un pneumatique ainsi qu'aux définitions correspondantes. Ainsi, comme illustré sur la Figure 5 et la Figure 6, ceux-ci sont notamment référencés à l'aide de trois chiffres nommés respectivement, la largeur l , la hauteur h et la taille de seat s (appelé aussi diamètre). Le premier de ces éléments, exprimé en millimètre, correspond à la largeur du pneumatique une fois celui-ci gonflé. Le second, quant à lui, est exprimé en pourcentage et indique le ratio entre la hauteur du flanc et la longueur l tandis que le troisième représente la taille du diamètre intérieure exprimée en pouces. Ces derniers correspondent à ce que l'on nomme la boîte géométrique du pneumatique. A celle-ci, doivent également être ajoutés les indices de charge et de vitesse afin d'obtenir la boîte dimensionnelle. Ces derniers définissent des propriétés du pneumatique relativement à sa capacité à conserver de bonnes performances jusqu'à une certaine vitesse et une certaine charge ; les segmentations correspondantes étant indiquées dans le Tableau 1. Tous ces éléments ne constituent pas les seuls indicateurs permettant de différencier les pneumatiques entre eux. En effet, à ceux-ci doit être adjointe la gamme à laquelle ils appartiennent. Au-delà d'une segmentation commerciale, ces dernières traduisent des caractéristiques réelles correspondantes à des procédés de fabrication ou des composants différents. Par exemple, un produit Michelin de la gamme Alpin 4 sera préconisé pour une utilisation en conditions hivernales et aura donc des propriétés d'adhérence particulières nécessitant des procédés de fabrication spécifiques.



Figure 5 : Les notations sur un pneumatique

Indice de charge	Poids maximum pouvant être supporté (Kg/pneu)
68	315
69	325
70	335
71	345
72	355
73	365
74	375
75	387
76	400
77	412

Indice de vitesse	Vitesse maximale
Q	160
R	170
S	180
T	190
U	200
H	210
V	240
ZR	>240
W	270
Y	300

Tableau 1 : Segmentation des indices de charges et de vitesse

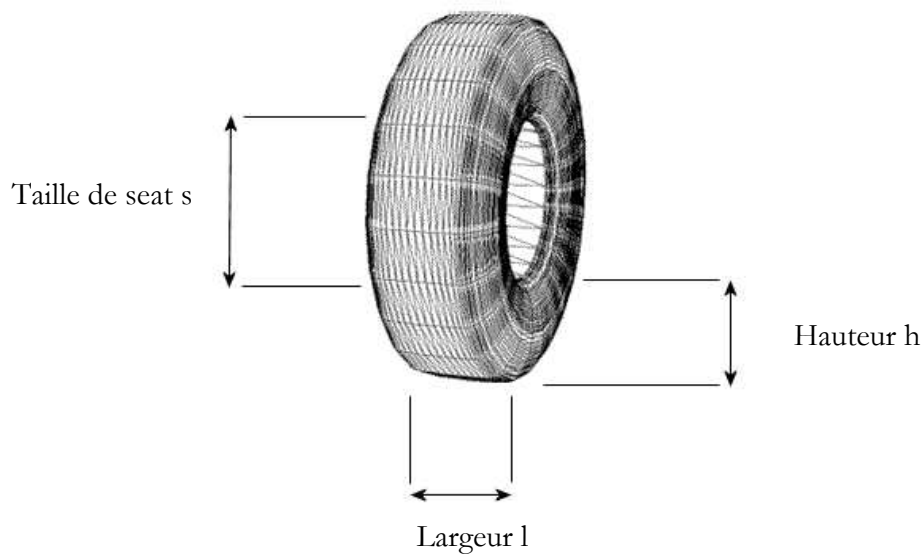


Figure 6 : Les dimensions d'un pneumatique

Dans le cadre du processus d'affectation de la production long terme de la Supply Chain TCE, seulement une partie de ces éléments sont considérés afin d'aboutir à la constitution des agrégats produits. Plus précisément, chacun de ces derniers est composé de pneumatiques appartenant à la même gamme, ayant la même boîte géométrique et étant destinés au même marché. Par marché, nous entendons ici celui du remplacement d'une part et les constructeurs automobiles d'autre part. Une telle segmentation assure l'obtention d'agrégats produits similaires

en termes de caractéristiques techniques et pour lesquels des prévisions long terme peuvent être établies.

Notons que la prise en compte d'agrégats produits et non de produits finis, dans le cadre de la planification stratégique, répond à deux motivations différentes. La première concerne la prévision de la demande. En effet, il est plus aisé d'obtenir des prévisions de demandes futures fiables pour des agrégats à fort volumes plutôt que pour des produits finis requis en plus faibles quantités. Au-delà de la loi des grands nombres, ceci provient notamment du fait que les erreurs de prévisions associées aux différents éléments composant un même agrégat produits se compensent pour partie entre elles. Ceci permet ainsi de réduire d'autant l'impact de l'incertitude liée à la répartition du choix des consommateurs entre les différents produits finis proposés. La seconde motivation provient, quant à elle, du fait qu'un tel regroupement des données diminue la complexité du processus d'affectation de la production par une réduction du nombre d'éléments à traiter et des quantités de données associées.

Malgré les règles de construction indiquées précédemment, certains agrégats produits différents peuvent partager des caractéristiques techniques communes. Ceci correspond, par exemple, à la fabrication des produits les constituants à partir de semi-finis identiques. Ceci correspond à la standardisation des différents agrégats produits, justifiant leur production en un même endroit dans le but de réaliser des économies. Par standardisation nous entendons le fait de remplacer un composant d'un produit par un autre ayant les mêmes caractéristiques, et même éventuellement plus, afin de diminuer leur nombre dans le but de réaliser des économies par une production massifiée [Fixson, 2007]. Ces économies, dues à une réduction du nombre d'opérations de maintenance à effectuer sur les machines afin de passer de la production d'un type de produits à un autre, et donc à une réduction des pertes de capacités associées, se traduisent de différentes façons. Comme illustré dans [Kemmo et al., 2012], elles se concrétisent notamment par une diminution des stocks ainsi qu'une hausse de la satisfaction de la demande. Dans cet article, nous proposons un MILP multi-périodes et multi-produits permettant l'évaluation de l'impact, sur les coûts de construction et de production d'une Supply Chain ainsi que sur le niveau de satisfaction de la demande, du degré de standardisation du portefeuille produit, c'est-à-dire le nombre de produits fabriqués à partir de composants identiques. Plus précisément, nous partons du constat réel que toute fabrication sur une même ligne de production, de produits nécessitant des composants communs (i.e. de produits standardisés), n'entraîne aucune perte de capacités. À l'inverse, nous considérons que le fait de fabriquer des produits techniquement différents sur une même machine nécessite des opérations de manutention conduisant à une immobilisation de cette dernière et, par conséquent, à des pertes de capacités. Partant de ces éléments, nous avons montré que le fait d'augmenter le degré de standardisation d'un portefeuille produit, se traduisant directement par une diminution des pertes de capacités, se concrétise par une augmentation de la fréquence de mise en fabrication des produits. Cette dernière entraîne, quant à elle, une réduction des stocks. Ceci a notamment été constaté à travers une étude portant sur le cas d'un système de production constitué de deux usines et fabriquant 10 produits sur un ensemble de 12 périodes. Pour celui-ci, ont été évalués, à l'aide du MILP, deux scénarios de standardisation à savoir le cas où tous les produits sont techniquement différents et celui où ils sont, de par le partage de semi-finis communs, regroupés au sein de 6 familles de standardisation. Dans ce contexte, nous avons constaté, comme illustré sur la Figure 7 tirée de ce même article, que dans le cas standardisé, le nombre de périodes de fabrication de chaque produit est plus élevé. Autrement dit, le nombre de périodes pendant lesquelles la demande de chaque produit doit être couverte par du stock est plus faible ; ceci se traduisant directement par une diminution de ces derniers (Figure 8). Notons que ceci est à rapprocher des contraintes de production évoquées ultérieurement (partie 3.4 de ce même chapitre).

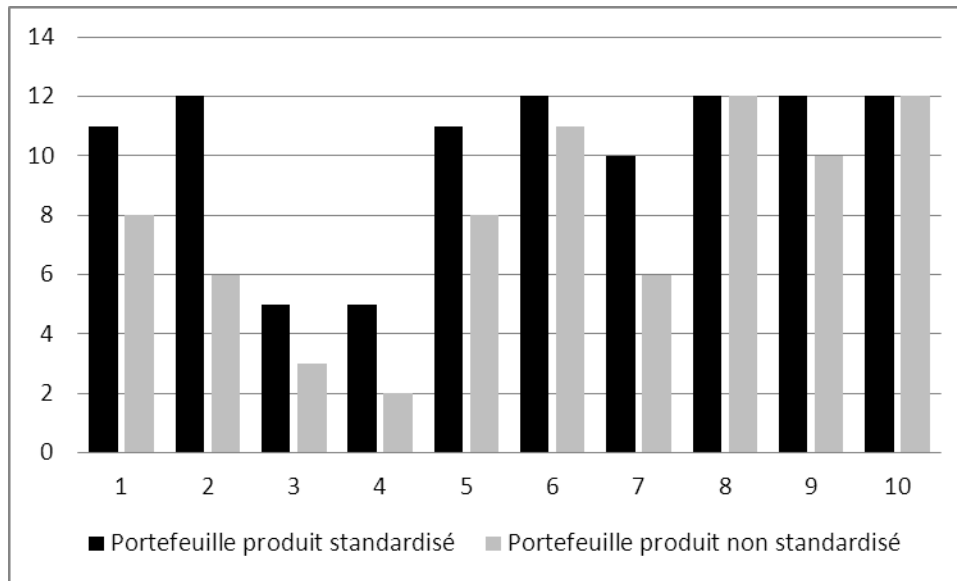


Figure 7 : Fréquence de mise en production des produits dans un cas standardisé et non standardisé [Kemmo et al., 2012]

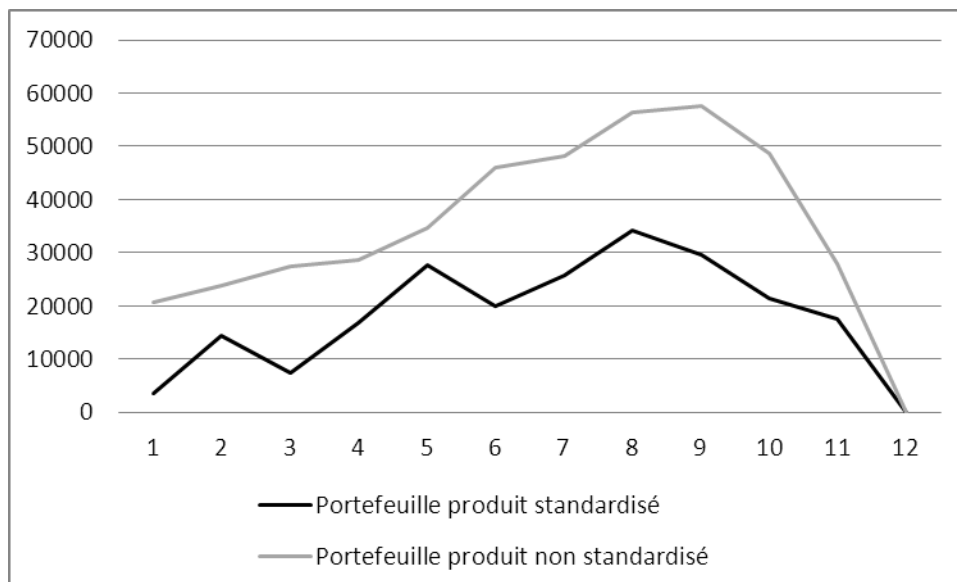


Figure 8 : Comparaison des stocks périodiques dans le cas d'un portefeuille produit standardisé et d'un autre non standardisé [Kemmo et al., 2012]

Notons qu'au-delà de ces aspects liés à la perte de capacité ainsi qu'à leur conséquences sur le niveau des stocks, l'arrêt des machines pour cause de maintenance se traduit également, en général, par la fabrication de produits défectueux suite à la réalisation de réglages inopportuns.

Compte tenu de ces avantages liés à la standardisation, il convient, lors de l'affectation des produits aux usines, de veiller à regrouper au maximum la production des agrégats produits réalisés à partir de composants identiques. De plus, notons que la notion de standardisation doit également être considérée bien en amont du processus d'affectation des productions. En effet, de par les différents éléments indiqués dans cette partie, il apparaît indispensable de se poser la question, lors de la définition d'un produit, de l'opportunité de le construire à partir de composants existants, ayant des caractéristiques techniques supplémentaires à celles désirées et s'avérant plus coûteux, mais présentant l'avantage d'être déjà utilisé pour la fabrication d'autres

éléments et de permettre ainsi de bénéficier des avantages liés à la standardisation [El Hadj Khalaf et al., 2009]. Précisons d'ailleurs que l'idéal est en réalité de procéder à la définition de la construction d'un futur produit conjointement avec celle de sa Supply Chain [Lamothe et al., 2006].

Afin de mieux appréhender ces différents éléments dans le cadre de la Supply Chain Michelin, il convient de s'intéresser au processus de fabrication d'un pneumatique, une fois les différents semi-finis réalisés. Celui-ci suit trois étapes principales à savoir la confection, la finition et la cuisson. La première consiste à assembler un premier sous-ensemble de composants dont des tringles métalliques et des nappes textiles composées de fils de fers afin d'obtenir une carcasse (Figure 9). Partant de cette dernière, la finition consiste à ajouter d'autres produits semi-fini telles que de nouvelles nappes textiles (appelées nappes carcasses) apportant de la résistance au pneumatique ainsi que la bande de roulement, qui sera ensuite au contact du sol, pour aboutir à un bandage (Figure 10). Nous pouvons noter qu'à l'issue de cette opération, le produit prendra sa forme définitive. Il sera ensuite cuit lors de l'étape de cuisson et passera ainsi d'un état plastique à un état élastique ; ceci aboutissant à une enveloppe. Notons, que cette dernière opération doit être effectuée dans un intervalle de temps relativement court (environ 48h00) après la finition. En effet, le caoutchouc, composant premier des pneumatiques, est une matière vivante dont les qualités ont tendances à se détériorer jusqu'à sa cuisson. Ceci suppose donc un temps relativement court entre la finition et cette dernière opération interdisant la constitution de stocks intermédiaires (i.e d'en cours de fabrication) trop conséquents.



Figure 9 : Carcasse



Figure 10 : Bandage

La production d'un pneumatique peut donc être décomposée en trois étapes particulières ; chacune d'elles constituant un potentiel point de différenciation entre les produits. Plus

précisément comme illustré sur la Figure 11, deux agrégats produits donnés seront soit différents à l'issue de la confection soit identiques. Dans ce dernier cas, c'est-à-dire s'ils partagent une carcasse commune, leur différenciation pourra s'effectuer durant la confection ou bien lors de la cuisson, ce dernier cas correspondant à deux agrégats produits partageant le même bandage.

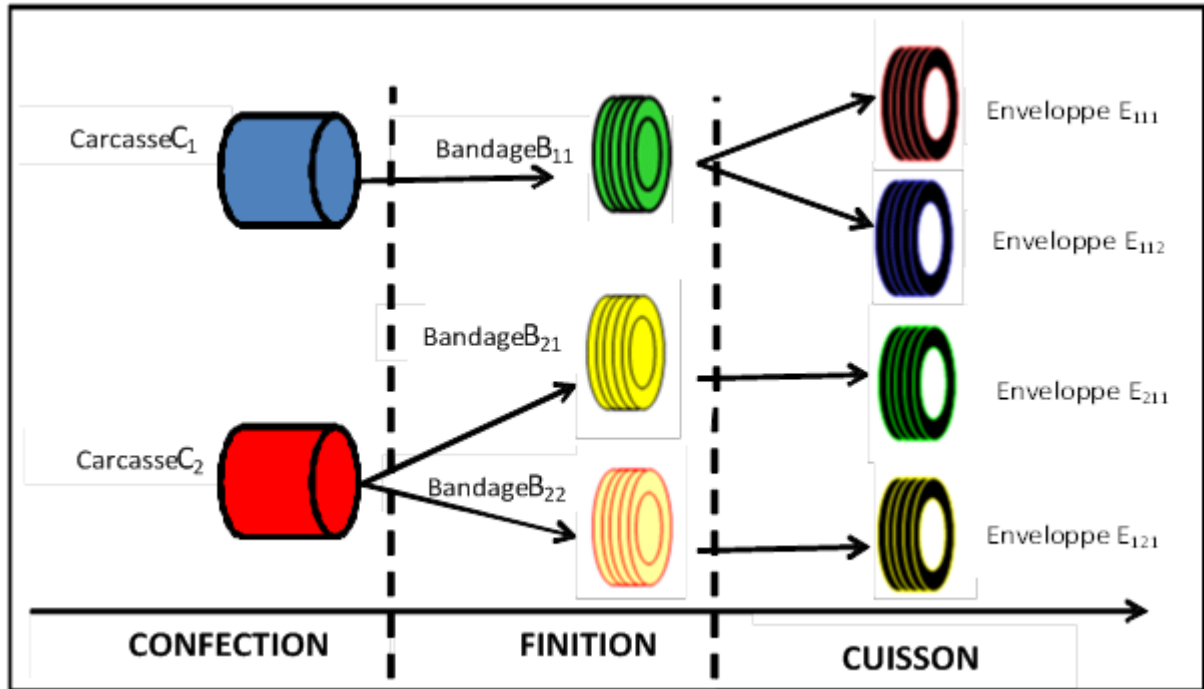


Figure 11 : Etapes de production et différenciation des produits

Remarquons que ce découpage confection-finition-cuisson correspond à l'utilisation de trois types de machines différents. Afin de limiter leur immobilisation, et conformément à ce qui a été précédemment évoqué, il convient de limiter au maximum la diversité des éléments à produire sur ces dernières, c'est-à-dire de regrouper au maximum la fabrication de ceux partageant des mêmes composants. Par exemple, on cherchera à réaliser sur les mêmes machines de confection, les éléments constitués d'une même carcasse. La prise en compte de cet aspect dans le cadre du processus d'affectation des productions aux usines n'est pas aisée. Il apparaît, en effet, impossible de considérer l'intégralité de ces points de différenciation en cherchant à regrouper les productions vis-à-vis de chacun de ces derniers sous peine d'engendrer une complexification trop importante du problème. Ainsi, un seul a été considéré, à savoir une des sous-étapes de la confection. Plus précisément, tous les agrégats produits partageant la même presque-carcasse ont été regroupés au sein d'une même famille de standardisation ; l'objectif étant alors de les produire au même endroit. Par presque-carcasse nous entendons un semi-fini intermédiaire à la carcasse correspondant à cette dernière diminuée de quelques composants. Remarquons que le choix de ce critère de différenciation des agrégats produits a été réalisé en fonction de leurs caractéristiques. En effet, il garantit l'obtention de regroupements constitués d'un nombre relativement important d'éléments tout en permettant de tenir compte des avantages liés à la standardisation. A ce sujet, il pourrait paraître préférable de considérer le point de différenciation le plus avancé, à savoir la cuisson. Cependant dans ce cas, nous obtiendrions des familles de standardisation se rapprochant de la notion même d'agrégats produits et, par conséquent, non pertinentes afin de profiter des avantages offerts par la standardisation.

Compte tenu des différents éléments indiqués au sein de cette partie, le processus d'affectation de la production aux usines s'effectue donc à la maille agrégat produit en s'efforçant, le plus possible, d'affecter à une même usine ceux appartenant à une même famille de standardisation, c'est-à-dire ayant une presque carcasse identique. Ceci permet de profiter des avantages liés à la standardisation à savoir une diminution du nombre de changements de production par une réduction de la diversité des éléments fabriqués sur chaque machine. Au-delà de ces paramètres, l'affectation des agrégats produit aux usines doit également tenir compte des caractéristiques techniques des différents moyens de production les composant ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

3.4. Les contraintes de production

Conformément aux éléments précédemment indiqués, la production d'un pneumatique suit trois étapes principales à savoir la confection, la finition et la cuisson. A chacune de ces dernières est associé un ensemble de machines spécifiques ayant des caractéristiques propres dont il convient de tenir compte lors de l'affectation des productions aux usines. Ces dernières correspondent respectivement à leur capacité maximale périodique, leurs capacités ainsi que le nombre maximal de changements de production pouvant y être réalisés. Le premier de ces éléments représente le nombre de produits finis différents pouvant être fabriqués chaque mois de l'horizon considéré. Celui-ci est énoncé en nombre de pneumatiques, puisqu'à un tel horizon les temps de production de ces derniers sont considérés comme identiques. Le second paramètre correspond, quand à lui, aux caractéristiques techniques de ces machines résultantes en une liste d'agrégats produits pouvant y être fabriqués.

Le troisième, quand à lui, est à relier à la notion de standardisation. En effet, il représente une limite sur le nombre maximal de changements de production pouvant être effectués chaque mois, c'est-à-dire une borne sur le nombre de passage de la fabrication d'une famille de standardisation à une autre. Cette valeur limite provient d'une décision externe visant à restreindre les pertes de capacités provenant de l'immobilisation des machines consécutivement à des changements de production. A ce stade de l'énoncé de cette contrainte, il convient de préciser l'importance que revêt la possibilité de passer de la fabrication d'une famille de standardisation à une autre. En effet, afin de limiter les pertes de capacités, nous pourrions opter pour un mode de production où chaque machine ne fabrique qu'une seule famille de standardisation par mois voire par an. Cependant, cette approche est illusoire et ceci pour différentes raisons. Tout d'abord, afin de pouvoir proposer, à tout moment, l'intégralité du portefeuille produit, il est indispensable de fabriquer plusieurs éléments chaque mois sur chaque moyen de production. En effet, il n'y a pas autant de machines de chaque étape qu'il y a de familles de standardisation. De plus, plus les changements de production sont faibles et donc peu fréquents, plus le nombre de périodes hors production de chaque produit est important. Or, lors de ces dernières, la demande doit être satisfaite à l'aide de stocks ; stocks dont le niveau est, comme illustré au sein de la partie 3.3, d'autant plus élevé que la période de non production est grande. Cet aspect est illustré via la Figure 12 et la Figure 13 présentant, pour un même produit, deux profils de production différents. Ainsi, on peut noter que dans le cadre de fréquences de mise en production peu élevées (Figure 12), les stocks sont plus importants que dans le cas de périodes de production plus rapprochées (Figure 13). Ce nombre maximum de changements de productions périodique répond donc à un arbitrage entre hausse du CRI issu des pertes de capacités et coût des stocks, auquel il convient d'ajouter la difficulté liée à la réalisation de certains réglages sur certains types de machines. Sa valeur est définie, lors de la planification stratégique (en parallèle au processus d'affectation des productions). Notons d'ailleurs que cette restriction sur le nombre maximal de changements de production est en adéquation avec la volonté de rassembler la fabrication des agrégats produits présentant des similarités techniques. En effet, le

regroupement de la production des éléments d'une même famille de standardisation aura pour conséquence de diminuer le nombre de changement de production et favorisera donc le respect de la borne correspondante.

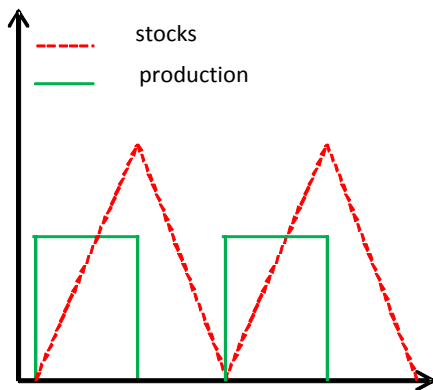


Figure 12 : Premier profil de production

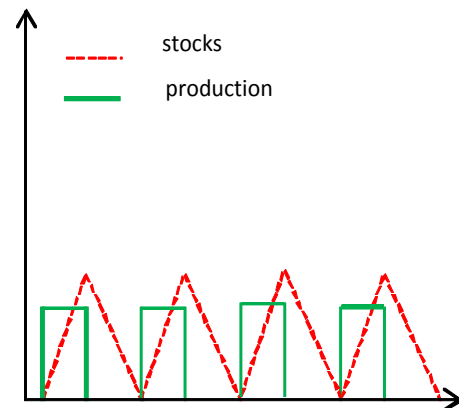


Figure 13 : Second profil de production

Jusqu'à maintenant, nous avons indiqué que l'affectation des productions est réalisée à la maille usine. Or, chacune d'entre elles est composée d'un ensemble de machines reliées entre elles et couvrant l'ensemble des étapes de confection, finition et cuisson; ceci résultant en autant de flux possibles comme illustré sur la Figure 14. Ainsi, bien que l'affectation des productions se fasse à la maille usine, celle-ci est effectuée en considérant les caractéristiques techniques des différentes machines ; celles-ci définissant les types et les quantités de chaque agrégat produit pouvant être réalisé. Afin de faciliter cette prise en compte, les usines ont été décomposées en un ensemble de lignes de production constituées chacune de machines de chaque étape homogènes en termes de capacités techniques. Ceci est illustré par le biais de Figure 15 sur laquelle est représentée une modélisation du système de production de la Figure 14. Ainsi, au-delà des usines, l'affectation des productions est effectuée en considérant les caractéristiques techniques des lignes de production les composant. Notons que dans le cadre de ce processus, seules les étapes relatives à la fabrication des produits finis sont considérées. Ainsi, aucune mention n'est faite des semi- finis, ceux-ci étant réalisés à l'aide de moyens spécifiques non considérés dans la notion de lignes de production.

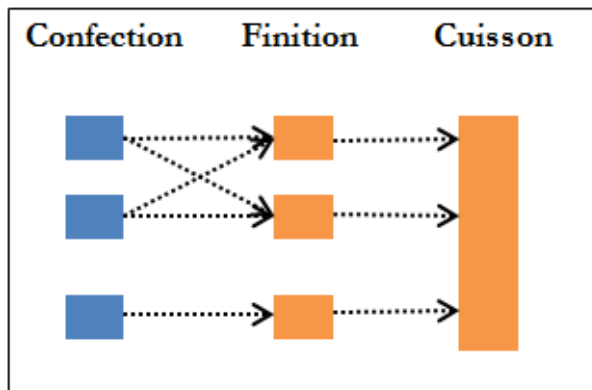


Figure 14 : Schéma générique d'une usine

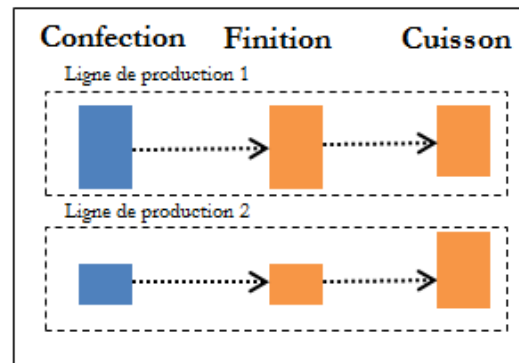


Figure 15 : Schématisation d'une usine en ligne de production

3.5. Les contraintes de ressources

La cuisson constitue une étape de la fabrication des produits finis particulière ; cette particularité provenant des machines utilisées à savoir des presses de cuisson. Celles-ci sont, en effet, capables de fabriquer une diversité très importante de produits par le recours à des ressources spécifiques, à savoir des moules. Ces derniers, relativement coûteux, sont propres à chaque agrégat produit et spécifient temporairement les presses au sein desquelles ils sont installés. Leur dimensionnement répond à différentes contraintes inhérentes au débit de la production. En effet, la cuisson étant la dernière étape de fabrication d'un pneumatique; elle doit être à même d'absorber le flux de produits provenant de la partie finition. De plus, elle doit le faire rapidement afin de cuire dans un temps adéquat les bandages et ainsi éviter leur détérioration. Or, les usines étant organisées en lignes de production, ces débits correspondent au goulot entre les parties confection et finition. En effet, préalablement à la réalisation de ces travaux, a été décidé de considérer le nombre de presses installées comme toujours suffisant afin de satisfaire le flux de produits. Ceci revient donc à considérer que les presses sont disponibles en une quantité infinie. Malgré cette hypothèse, l'absorption du flux de production provenant de la partie finition suppose tout de même de disposer d'une quantité de moules, associés à l'agrégat produit considéré, adéquate. Ainsi, à chaque ligne de production est associé un nombre minimum de moules à installer dès lors qu'un agrégat produit y est fabriqué ; nombre minimum provenant comme indiqué ci-dessus du débit de production. Cependant, il convient de bien insister sur le fait que cette valeur est une quantité minimum. Plus précisément, dès lors que le nombre d'éléments à fabriquer dépasse la capacité, correspondante à cette valeur, une quantité plus importante de moules doit être installée. Par conséquent, le dimensionnement de ces derniers, relativement à la production d'un agrégat produit sur une ligne de production donnée, correspond au maximum entre la quantité minimum associée à cette dernière et celle nécessaire à l'absorption du volume mis en fabrication.

A ce stade de ce document, nous pourrions penser que cette problématique du nombre de moules relève plus de la planification tactique que de la planification stratégique ; leur dimensionnement dépendant de la planification de la production adoptée. Or il n'en n'est rien. En effet, tout d'abord les coûts associés à ces ressources sont relativement élevés si bien qu'ils doivent être budgétisés sur le long terme et non au niveau tactique. A ceci s'ajoute le fait que le temps nécessaire à l'obtention d'un moule est relativement long. En effet, ces derniers sont produits à l'unité par une entité spécifique si bien qu'il convient de prévoir longtemps à l'avance le nombre et le type de ces derniers à acheter. De plus, les quantités minimum de moules à

installer étant différentes entre les lignes de production, selon l'affectation de la production réalisée le nombre de moules à acheter pourra être plus ou moins conséquent. A titre illustratif, considérons un exemple relativement simple composé de deux moyens de production l_1 et l_2 , requérant respectivement 9 et 10 moules au minimum pour fonctionner, ainsi que deux agrégats produits a_1 et a_2 dont les volumes de productions nécessitent respectivement 8 et 10 moules. La solution consistant à affecter a_1 à u_2 et a_2 à u_1 entraînera l'installation de 20 moules tandis que celle allouant a_1 à u_1 et a_2 à u_2 n'en nécessitera que 19. Bien entendu, ce court exemple est volontairement simpliste puisqu'il faut également tenir compte des contraintes de capacités et du fait que plusieurs agrégats produits sont à affecter à chaque usine. Cependant il illustre bien l'importance à accorder à ces ressources lors de l'affectation des productions dans le cadre du processus de planification stratégique. Remarquons que contrairement à ce que nous avons indiqué jusqu'à maintenant, les moules sont en réalité spécifiques à chaque produit fini. Cependant, pour un même agrégat produit, ces derniers sont formés à partir d'un certain nombre de composants communs, quel que soit le produit fini considéré. Or, ces constituants expliquent la majeure partie du coût de ces ressources si bien que dimensionner le nombre de moules à la maille agrégat produit, revenant en réalité à définir le nombre de ces composants à acquérir, constitue une approximation acceptable à un tel horizon.

Dans le cadre de l'affectation des productions, doit donc être définis le nombre de moules de chaque type à acquérir. Cependant, ce dimensionnement doit être réalisé tout en tenant compte de l'état initial de la Supply Chain considérée. Avant d'aborder cet aspect dans la partie suivante, il convient de noter que dans le cadre de la planification stratégique, les moules sont considérés comme propres à chaque usine et ne peuvent pas faire l'objet de transferts entre ces dernières.

3.6. Prise en compte d'un état initial

Le groupe Michelin ayant été fondé en 1889, son système de production est relativement bien établi, notamment sur le territoire Européen. Ainsi, lors du processus d'affectation long terme de la production, il convient de tenir compte de cet historique et des contraintes inhérentes. Comme indiqué au sein des précédents paragraphes, celles-ci correspondent aux contraintes machines évoquées précédemment ainsi qu'à l'affectation actuelle des agrégats produits; ceci résultant en un dimensionnement des ressources associées au sein de chaque usine. Bien entendu, une telle situation n'est pas figée et doit être remise en cause afin de s'adapter aux modifications du marché. Ainsi, le processus d'affectation de la production ne consiste pas seulement à attribuer la fabrication des nouveaux produits, mais également à reconsidérer les décisions prises les années précédentes ; et ceci afin de permettre la construction d'un système de production le plus adapté possible à l'environnement économique en vigueur. Par conséquent, il convient, en fonction des nouvelles « données marché », d'identifier l'opportunité de changer ces affectations. Ceci doit être réalisé en confrontant les avantages d'une telle modification avec les surcoûts engendrés. Cependant, il est important de noter que le nombre de changements pouvant être effectués n'est pas infini mais au contraire limité. En effet, dans un tel contexte industriel, il est illusoire de vouloir modifier totalement le système de production considéré et ceci pour diverses raisons. Tout d'abord, de telles modifications requièrent bien souvent des investissements conséquents dont la rentabilité n'est garantie qu'au bout de plusieurs années. Ainsi, leurs réalisations nécessitent de la liquidité monétaire disponible qu'en quantité limitée à moins de mettre à mal la santé financière de l'entreprise. De plus, ils entraînent une désorganisation de la production conduisant à des pertes de capacités et donc de production. Ceci est par exemple provoqué par la nécessité de modifier les machines ou encore de former le personnel à la fabrication de nouveaux types de produits.

Remarquons que, bien entendu, cette limitation sur le nombre de modifications pouvant être réalisées ne porte pas sur les nouveaux agrégats produits pour lesquels aucun investissement, en termes d'adaptations des machines et d'achats de moules, n'a été effectué lors de la réalisation de l'affectation de la production précédente.

L'intégralité des décisions évoquées jusqu'à maintenant sont prises en fonction des coûts engendrés mais également de la demande. Or, à un tel horizon, celle-ci ne peut être connue précisément, si bien qu'il convient, dans le cadre de la planification stratégique, de tenir compte des potentielles erreurs de prévisions résultantes en une incertitude sur le niveau réel des quantités à produire.

3.7. Prise en compte de l'incertitude

3.7.1. Incertitude et robustesse

Durant ces dernières années, l'environnement économique n'a cessé de changer pour passer à un marché globalisé provoquant une hausse de la concurrence entre les entreprises. En réaction, ces dernières n'ont cessé de chercher à se démarquer les unes des autres en adoptant de nouvelles stratégies commerciales. Ainsi, celles-ci se sont lancées dans une course à l'innovation perpétuelle se traduisant par un raccourcissement du cycle de vie des produits ainsi qu'une hausse de la diversité proposée. Consécutivement à ces modifications, le comportement des consommateurs a lui-même changé ; s'illustrant, par exemple, par leur désir de personnaliser leurs achats (phénomène de « customisation »). Tous ces éléments ont rendus de plus en plus difficile la réalisation de bonnes prévisions de la demande, et ceci d'autant plus pour un horizon de temps important.

Dans ce contexte, il est indispensable, pour tout système telle qu'une Supply Chain, de considérer l'incertitude pesant sur la demande dans le cadre de ses différents processus décisionnels. En effet, celle-ci, se traduisant souvent par une différence entre prévisions et ventes réelles, peut avoir un impact très important sur sa capacité à opérer efficacement et profitablement [Davis, 1993]. Cette prise en compte nécessite donc la considération, non pas des seules prévisions uniquement, mais également de scénarios alternatifs correspondants à des variations de ces dernières. Cette logique s'associe, notamment, à la volonté de construire des systèmes robustes ; ce dernier terme pouvant être défini comme une solution restant proche de l'optimale quel que soit le scénario de demande réelle [Leung et al., 1997]. Plus précisément, nous entendons par celui-ci une configuration permettant à la Supply Chain de satisfaire profitablement la majorité de la demande et, ce, quel que soit son niveau réel. Ceci peut supposer de ne pas prendre la meilleure décision relativement aux prévisions mais d'en privilégier une autre, un peu moins bonne, mais permettant de s'adapter à un plus grand nombre de situations économiques.

Plusieurs options peuvent être envisagées afin de construire une solution robuste. L'une d'entre elles correspond au choix et à la construction de leviers de flexibilité adaptés.

3.7.2. Dimensionnement de la flexibilité

Une des manières les plus communes et les plus efficaces afin de pallier l'incertitude apparaissant au sein d'un système de production est de procéder au dimensionnement de leviers de flexibilité. Ces derniers correspondent à des moyens permettant, face à des variations, de réagir avec peu de pénalités en termes de temps, d'efforts, de coûts et de performances [Upton, 1994]. Ceux-ci peuvent prendre différentes formes dont des réserves capacitaires, l'achat de machines capables de fabriquer différents types de produits ou encore la constitution de stocks de sécurité.

De par le temps relativement important nécessaire à la mise en place de ces différents éléments ainsi que leur surcoût, ceux-ci doivent être considérés dans le cadre de la planification stratégique. Ceci est d'ailleurs souligné par de nombreux chercheurs tels que Adam et Swamidass [Adam et Swamidass, 1989] qui indiquent que la prise en compte des leviers de flexibilité, dans le cadre de ce processus long terme, est aussi importante que celle des coûts, de la qualité ou encore des technologies utilisées.

Bien que le cycle de vie des pneumatiques soit plus important que celui d'autres produits manufacturiers, le groupe Michelin est également soumis à une incertitude sur la demande. Ainsi, dans le cadre de l'affectation de la production, ce danger est considéré, notamment, par le dimensionnement de leviers de flexibilité particuliers. Ces derniers consistent à affecter, à plusieurs usines, la production d'un même agrégat produits. En effet, ceci présente l'avantage de pouvoir adapter la charge à la capacité, en fonction de la demande réelle, par le transfert de quantités à produire entre les différentes unités de production. Comme indiqué dans la suite de ce document, un tel moyen d'action est appelé mix flexibilité au sein de la littérature scientifique [Chandra et al., 2005].

Remarquons que, de par la flexibilité offerte par cette double affectation, il pourrait être préconisé d'allouer d'office chaque agrégat produit à plus d'une usine. Cependant, ceci présente un surcoût non négligeable qu'il convient de limiter. En effet, cela nécessite, par exemple, d'acquérir un plus grand nombre de moules que dans le cas d'une mono-affectation, notamment de par les contraintes de moules minimum. De plus, notons que le fait de procéder à une affectation de la production à la maille agrégat produits et non en considérant des produits finis n'interdit pas le dimensionnement de ce levier de flexibilité. En effet, de par leurs règles de construction, tous les produits finis les constituant peuvent être fabriqués sur les mêmes moyens de production et peuvent donc faire l'objet de transferts entre les lignes de production réalisant un autre élément du même agrégat. Ainsi, le fait d'allouer à deux usines un même agrégat produits permet d'obtenir la flexibilité escomptée, à savoir la possibilité d'adapter la charge à la capacité par l'ajustement des volumes de production au sein de chaque entité.

L'affectation des productions aux usines, constitue donc un élément, du processus de planification stratégique, relativement important, pour la Supply Chain TCE puisqu'ayant des impacts non négligeables sur le pilotage tactique de cette dernière et sur sa capacité à satisfaire la demande à moindre coût. Conformément aux éléments mentionnés ci-dessus, celle-ci doit être effectuée en considérant une diversité importantes de contraintes portant tant sur des aspects techniques (capacité des machines, capacités,...) qu'environnementaux (incertitude sur la demande). Ceci rendait sa réalisation d'autant plus difficile qu'elle était effectuée à l'aide de divers outils séparés ; outils ne présentant pas de réels modules d'optimisation. En effet, dans ce cas l'analyse rigoureuse des différentes situations possibles, que cela soit en termes d'affectation des productions que de scénario de la demande, est relativement ardue à mettre en œuvre. A ceci s'ajoute la difficulté de mesurer les impacts d'une décision stratégique au niveau tactique, véritable indicateur de la qualité d'une solution. Par conséquent, est apparu le désir de disposer d'un outil permettant de faciliter ce travail de définition, de confrontation ainsi que d'analyse de solutions,

c'est-à-dire d'un outil d'aide à la décision dont la réalisation a constitué l'objectif industriel de ce doctorat, comme indiqué dans la partie suivante.

3.8. Objectif industriel

Conformément aux éléments indiqués précédemment, la thèse, dont les travaux associés sont présentés dans ce document, a fait l'objet d'un contrat CIFRE et a, à ce titre, été réalisée au sein du LIMOS et de la société Michelin. Elle a donc revêtu un objectif industriel, à savoir la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour le problème d'affectation stratégique de la production de la Supply Chain Michelin TCE, décrit au sein des parties précédentes. Celui-ci avait pour but de faciliter le processus d'affectation long terme des produits, en permettant une évaluation de la solution existante ainsi que la proposition d'alternatives à cette dernière permettant de maximiser la satisfaction de la demande ainsi que le profit associé. De plus, et c'est là sa principale valeur ajoutée, il devait apporter une meilleure prise en compte de l'incertitude relative à la demande notamment par un dimensionnement adéquat de la flexibilité, c'est-à-dire du nombre et du type d'agrégats produits à affecter à plus d'une usine.

Bien entendu, au-delà de cet objectif, les solutions proposées par l'outil d'aide à la décision, constituées d'une affectation de la production et d'un dimensionnement du nombre de moules ainsi que de la flexibilité associés, devaient tenir compte de l'ensemble des éléments évoqués ci-dessus. Ainsi, l'affectation devait donc être réalisée en considérant des agrégats produits ainsi que des usines représentées sous la forme d'un ensemble de lignes de productions tout en cherchant à satisfaire les différents paramètres et contraintes introduits tout au long de ce chapitre à savoir :

Des contraintes machines (capacités, capabilités et nombre maximum de changements de production périodiques) exprimées à la maille ligne de production ;

Des contraintes de ressources (quantités minimum de moules à installer sur chaque ligne de production ainsi que capacités de ces derniers) ;

Une solution initiale ne pouvant seulement faire l'objet d'un nombre limité de modifications ;

La standardisation correspondant à la volonté de regrouper en un même lieu la fabrication des agrégats produits appartenant à une même famille de standardisation ;

L'incertitude relative à la demande.

Notons qu'alors même que ces différents éléments étaient initialement adressés à l'aide de données annuelles, ils l'ont été à la maille mois dans le cadre de la réalisation de l'outil d'aide à la décision. Ceci constitue l'un des apports de ces travaux de thèse pour la société Michelin. Il offre en effet l'avantage de permettre une prise en compte plus fine des différentes contraintes et ainsi de rendre plus fiable l'évaluation des configurations d'affectations proposées. A titre illustratif, ce passage à la maille mensuelle permet, par exemple, de tenir compte des effets de saisonnalité de la demande ainsi que des capacités pouvant mettre en évidence des déséquilibres charges-capacités ponctuels importants; ceci étant impossible dans le cas de paramètres exprimés pour une année entière.

La réalisation de cet outil d'aide à la décision a nécessité trois grandes étapes, à savoir la définition précise de la problématique, la modélisation du problème et la définition de méthodes de résolution adaptées. Notons d'ailleurs que c'est de la première d'entre elles qu'est issue l'ensemble des éléments évoqués jusqu'à présent.

Cet objectif industriel ainsi que la problématique associée, n'ont pas constitué l'intégralité des travaux réalisés au cours de cette thèse. En effet, ceux-ci ont été étendu dans le cadre de nos activités de recherche afin de se ramener à un problème théorique ; ceci se caractérisant

notamment par la réalisation de modèles et méthodes de résolutions moins spécifiques et présentant l'avantage de pouvoir être utilisés dans le cadre de problèmes plus vastes. Cette extension de la problématique industrielle a, notamment, été réalisée par l'ajout de contraintes supplémentaires, comme illustré dans la partie suivante.

4. Travaux de recherche

4.1. Une extension du problème industriel

Bien qu'à l'origine de la thèse faisant l'objet de ce document, le problème industriel présenté précédemment n'a pas constitué l'intégralité de nos activités de recherche mais plutôt une brique majeure. En effet, celui-ci a été étendu afin de se ramener à un problème théorique adressant d'avantage de contraintes et étant ainsi plus facilement transposable au cas d'autres entreprises.

4.1.1. Premier objectif de la thèse : modèle d'affectation et de dimensionnement stratégique

Les différentes modifications et contraintes additionnelles apportées (et au contraire celles supprimées) à la problématique de la Supply Chain TCE Michelin ont eu pour objectif d'étendre ce cas spécifique à un problème théorique plus général. Elles ont concerné différents aspects, à commencer par celui relatif à la gestion et au dimensionnement des moules. Plus précisément, dans notre cas, ces derniers n'ont pas été considérés comme propres aux usines mais, au contraire, comme des éléments pouvant être transférés entre ces dernières. Ainsi, cette possibilité de faire transiter des moules entre les unités de production a été vue comme un élément de pilotage permettant de diminuer les investissements à réaliser tout en assurant un niveau de service identique ; c'est-à-dire une décision d'ordre tactique à considérer lors de la planification stratégique. Autrement dit, nous estimons opportun de se poser la question, lors de ce processus de décision long terme, de savoir s'il est préférable d'en installer un nombre adéquat au sein de chaque usine ou bien de les partager entre ces dernières, quitte à les faire transiter entre elles au niveau tactique. Bien entendu, une telle décision doit être prise au regard des coûts inhérents à leur achat ainsi qu'à ces éventuels transferts, c'est-à-dire au regard d'investissements stratégiques mais également de coûts plus courts termes. Notons que cette possibilité n'est valable que dans le cas de moules utilisés afin de fabriquer des agrégats produits affectés à plusieurs usines. Remarquons également que, dans le cadre de nos activités de recherche, nous ne considérons pas des moules mais d'une manière plus générale des ressources dont l'utilisation est soumise à leur installation dans une certaine quantité (quantité minimum relatives aux lignes de production). Ceci fait référence à des contraintes de process de fabrication, similaires au cas des moules dans le cadre de la Supply Chain Michelin TCE, mais également à des réglementations relatives à la sécurité au sein des sites de production. En plus de cet aspect et comme précédemment, ces ressources sont bien entendu considérées comme ayant une capacité limitée. Au-delà des contraintes relatives à ces dernières, nous conservons les autres mentionnées dans les parties précédentes. Ainsi, nous considérons des usines composées de lignes de production soumises à des contraintes de capacités, de capacité technique mais également d'une restriction sur le nombre de familles de standardisation différentes pouvant y être fabriquées lors d'une même période. Ce dernier point correspond à la limitation, sur le nombre de changements de production, précédemment évoquée. De plus, nous tenons également compte du fait, qu'en général, les décisions prises relativement au dimensionnement d'une Supply Chain, le sont à partir d'un état existant. Autrement dit, nous considérons la notion de configuration initiale

contraignant l'espace des solutions de par une limitation sur le nombre de modifications pouvant être réalisées. A ceci s'ajoute la prise en compte du caractère incertain de la demande par le dimensionnement de leviers de flexibilité, qui dans notre cas correspondent à la mix flexibilité c'est-à-dire à l'affectation, à plusieurs usines, de la fabrication de mêmes produits permettant une adaptation de la charge à la capacité en fonction de la demande réelle [Chandra et al., 2005].

Pour résumé, le premier problème adressé dans le cadre de ces travaux de doctorat a pour objectif de construire des modèles et méthodes permettant de définir une affectation long terme des productions aux usines dans le cadre d'une Supply Chain soumise à une demande incertaine mais également de procéder à un dimensionnement de la flexibilité ainsi que des ressources. Par flexibilité, nous entendons la mix-flexibilité provenant de l'affectation de la production d'un même agrégat produit à plusieurs usines ; ceci permettant d'ajuster la charge à la capacité par le biais de transferts de production. Dans ce contexte sont considérés différents paramètres, à savoir :

Des contraintes machines : capacités, capabilités et nombre maximum de changements de production périodiques exprimés à la maille ligne de production.

Des contraintes de ressources : capacité de ces dernières ainsi que nombre minimum à installer sur chaque ligne de production afin de pouvoir fabriquer un quelconque élément.

Une solution initiale ne pouvant faire l'objet que d'un nombre limité de modifications pour cause de contraintes budgétaires et de volonté de ne pas désorganiser d'une manière trop conséquente la Supply Chain. Celle-ci restreint donc l'espace des solutions réalisables.

La standardisation correspondante à la volonté de regrouper en un même lieu les agrégats produits appartenant à une même famille de standardisation ainsi qu'aux pertes de capacités issues de la fabrication de deux différentes sur une même ligne de production ;

L'incertitude relative à la demande.

Notons que dans ce contexte, les décisions sont prises en considérant des agrégats produits et non des produits finis. De plus, insistons sur le fait que sont également pris en compte les potentiels transferts de ressources. Ceux-ci sont considérés comme des éléments permettant de réduire les différents investissements stratégiques sans pour autant affecter l'efficacité de la Supply Chain. Il convient également de noter que de par le caractère industriel de nos travaux, les modèles et méthodes de résolution développés doivent permettre de résoudre des problèmes de grandes tailles et pas seulement des petites instances.

Bien que relativement complet, ce problème théorique n'a pas constitué l'intégralité de nos travaux de recherche. En effet, celui-ci a été intégré au sein d'une démarche globale de planification d'une Supply Chain. Plus précisément, au-delà de la réalisation de modèles et méthodes de résolution pour l'affectation stratégique des productions et le dimensionnement de ressources ainsi que de la flexibilité du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain, l'objectif de nos activités de recherche a été la construction d'un environnement global de planification couvrant, certes, l'horizon stratégique mais également les décisions tactiques et opérationnelles.

4.1.2. Réalisation d'un environnement intégré de planification

La réalisation de modèles et méthodes de résolutions, pour l'affectation stratégique des productions ainsi que le dimensionnement des ressources et de la flexibilité du système de production d'une Supply Chain, représente seulement une des étapes de l'environnement intégré de planification dont la construction constitue le second objectif des activités de recherche menées dans le cadre de ce doctorat. Celui-ci consiste à couvrir la majeure partie des décisions relatives au pilotage et à la gestion stratégique, tactique et opérationnelle d'une Supply Chain et notamment de son système de production. Ainsi, comme décrit ultérieurement, celui-ci a été décomposé en quatre étapes principales à savoir deux phases stratégiques, une phase de planification tactique et une autre opérationnelle. La première d'entre elles est associée au dimensionnement long terme des capacités d'un tel système ; le tout en considérant l'incertitude relative à la demande. La seconde, quant à elle, correspond au cas de la problématique industrielle précédemment introduite, c'est-à-dire à la réalisation d'une affectation long terme des productions ainsi que d'un dimensionnement des ressources en tenant compte, là aussi, de l'incertitude relative à la demande. De plus ; à cette étape est adjointe celle du déploiement capacitaire, c'est-à-dire la détermination de la part des capacités maximales théoriques à utiliser en marche courante et celle à réserver à la flexibilité volume [Volling et al., 2013]. Bien entendu, ces décisions sont prises au regard du dimensionnement capacitaire, décidé durant la première phase, dont elles peuvent provoquer la modification. Ceci correspond à la boucle de faisabilité interne au niveau stratégique permettant de valider ou infirmer les décisions prises à un niveau au regard des impacts engendrés sur le niveau inférieur. Nous pouvons remarquer que ces deux étapes s'inscrivent pleinement dans le cadre des décisions stratégiques relatives à la production représentées sur la Figure 4 et notamment de la réalisation d'une partie du plan industriel et commercial (PIC).

Comme illustré sur cette même figure, les décisions stratégiques doivent être ensuite déclinées dans le cadre tactique, ce qui se traduit au niveau de la production par la définition du Programme Directeur de Production (PDP). Dans ce contexte, la troisième étape de notre environnement intégré consiste à réaliser le principal objectif d'un PDP à savoir la planification des différentes activités de la Supply Chain afin d'optimiser l'utilisation des ressources dans le but de satisfaire la demande à moindre coût. Plus précisément, il s'agit de définir les quantités mensuelles de chaque produit à fabriquer sur chaque ligne de production. Ainsi, cette troisième phase sert, comme indiqué sur la Figure 4, de cadre à la définition des quantités de composant à fabriquer dans le cadre du processus MRP. Celui-ci est réalisé lors de la planification opérationnelle qui correspond à la quatrième et dernière étape de notre environnement intégré de planification. Celle-ci a pour objectif de déterminer le taux d'utilisation des différentes machines de chacune des lignes de production du système considéré dans le but d'établir un plan de charge court terme.

L'un des principaux atouts d'un environnement intégré de planification est de permettre la bonne intégration des différents processus de planification stratégique, tactique et opérationnelle, ce qui suppose de faciliter la déclinaison des éléments décidés entre les différents horizons. Au-delà de cet aspect, ceci implique d'identifier les éventuels désagréments provoqués par certaines décisions sur le niveau inférieur dans le but de prendre des mesures correctrices adaptées. Ainsi, en plus des différentes étapes décrites précédemment, l'environnement intégré de planification a été doté de différentes boucles de faisabilité permettant de remplir ce rôle de validation, ou d'infirmer, des différentes décisions en fonction de leurs conséquences sur l'horizon de planification immédiatement inférieur.

Au-delà de la réalisation de méthodes et modèles permettant de résoudre le problème industriel étendu de la Supply Chain Michelin TCE, l'objectif des activités de recherche réalisées

dans le cadre de ce doctorat est donc d'aboutir à la réalisation d'un environnement de planification couvrant les horizons stratégiques, tactiques et opérationnels. Plus précisément, il s'agit de considérer la majorité des décisions relatives à ces différents types de planification ainsi que les boucles de faisabilité les liants. A ceci s'ajoute la prise en compte des aspects relatifs à l'incertitude sur le niveau réel de la demande, le dimensionnement et l'utilisation de la flexibilité ainsi que la prise en compte d'une solution initiale. A travers ces éléments, nous pouvons donc noter que nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre du Supply Chain Network Design (SCND), comme indiqué au sein de la partie suivante.

4.2. Une thématique de recherche : le Supply Chain Network Design

Les travaux de recherches réalisés dans ce document portent essentiellement sur les systèmes de production. Cependant, malgré le fait qu'ils aient attiré à une seule des étapes d'une Supply-Chain, ils se rattachent d'avantages à la littérature relative à de tels systèmes. En effet, est considéré ici un réseau d'entités reliées entre elles par l'intermédiaire de potentiels transferts de charges. Or, de telles interactions se rapprochent moins des recherches menées relativement aux systèmes de production qu'à celles portant sur les Supply Chain. De plus, un certain nombre de décisions impactant les acteurs en liens avec ce réseau est considéré. Ainsi, par exemple, dans le cadre stratégique, le nombre de changements d'affectation de production vis-à-vis de la solution existante doit être minimisé au maximum et ceci, notamment, afin de limiter la désorganisation des parties approvisionnement et distribution. De plus, toujours pour ce même horizon de planification, les agrégats considérés correspondent à ceux qu'il convient d'adresser dans le cadre d'une étude portant sur une Supply Chain plutôt que sur des usines. Plus précisément, sont pris en compte des regroupements de produits (agrégats produits) ainsi qu'un ensemble d'usines mais également des leviers de flexibilités tels que la mix flexibilité qui correspondent à des mailles adressées dans le cadre de problèmes relatifs aux Supply Chain [Bertrand, 2003]. A contrario, une étude portant sur des unités de production uniquement considérerait plutôt, par exemple, la flexibilité de chaque machine individuellement. Il convient également de remarquer que la majorité des modèles et méthodes de résolution proposées dans le cadre de ces travaux de recherches sont facilement extensibles à la prise en compte des parties distribution et approvisionnement.

Les travaux relatifs aux Supply Chain se rattachent à de nombreuses et diverses thématiques de recherche. Ceux présentés dans ce document, ayant des aspects relatifs au pilotage ainsi qu'au dimensionnement de tels systèmes, s'inscrivent dans le cadre de la littérature associée au Supply Chain Management (SCM). Ce dernier terme peut être défini comme « le processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle des opérations d'une Supply Chain. Il couvre tous les mouvements ainsi qu'opérations de stockage des matières premières, des en-cours et des produits finis depuis le point de départ jusqu'au point de consommation » [Melo et al., 2009]. A ce titre, la littérature relative au SCM comporte différents champs de recherche tel que la planification tactique, les processus opérationnels ou encore le Supply Chain Network Design (SCND) dans lequel s'inscrivent plus particulièrement les travaux présentés ici. Ce dernier est un processus stratégique consistant à prendre plusieurs types de décisions telles que la localisation des nouvelles entités d'une Supply Chain, les investissements à effectuer dans celles existantes, les liens entre ces dernières ou encore l'affectation des productions [Georgiadis et al., 2011]. Celui-ci est souvent confondu avec le processus de planification stratégique avec lequel il partage de nombreuses similitudes [Melo et al., 2009]. De par cette définition, nous pouvons donc voir que nos travaux se rattachent bien à cette thématique, ceux-ci portant principalement sur des décisions d'ordre stratégique même si, de par la réalisation d'un schéma de planification intégré, les planifications tactiques et opérationnelles sont également considérées.

5. Conclusion

La thèse, dont les travaux associés sont présentés dans ce document, a fait l'objet d'un contrat CIFRE. A ce titre elle a été réalisée au sein d'un laboratoire de recherche ainsi qu'une entreprise, en l'occurrence respectivement le LIMOS et le groupe Michelin. De par cette caractéristique, lui a été associé un objectif industriel correspondant à la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour la planification stratégique de la Supply Chain Michelin TCE. Cette dernière entité, responsable de la production ainsi que de la distribution des pneumatiques du groupe Michelin en Europe, est en effet soumise à un environnement complexe nécessitant la mise en œuvre de processus de pilotage clairement établis tel que celui relatif à l'affectation long terme des productions. Celui-ci a pour but de définir, sur un horizon de plusieurs années, les usines au sein desquelles seront fabriquées les différents éléments du portefeuille produit actuels et futurs, ainsi que le nombre de moules à affecter à ces dernières. De plus, la Supply Chain Michelin TCE étant soumise à une incertitude sur le niveau réel de la demande, il a également pour objectif de dimensionner la flexibilité du système de production associé et ceci, notamment, par la multi-affectation de certains produits. Outre cet aspect relatif à l'incertitude sur la demande, ce processus de décision long terme est également soumis à un nombre important de paramètres telles que des contraintes machines, des contraintes relatives au dimensionnement des moules ou encore la prise en compte de l'affectation de la production existante. Ce dernier point correspond au fait que toute décision doit être prise en considérant la configuration courante de la Supply Chain, configuration ne pouvant être modifiée que dans une certaine mesure. A ces éléments, s'ajoute la nécessaire prise en compte des avantages liés à la standardisation, c'est-à-dire le fait que fabriquer au même endroit des produits constitués de mêmes composants engendrent des réductions de coûts par une diminution des pertes de matières ainsi que de capacités des machines ; ces derniers points étant issus de leur arrêt suite à la réalisation de réglages indispensables au passage de la fabrication d'un type de produits à un autre.

La réalisation d'un tel outil d'aide à la décision, n'a pas constitué réellement les travaux de recherche réalisés dans le cadre de ce doctorat. En effet, la problématique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin a été modifiée, notamment par l'ajout de la possibilité de réaliser des transferts de ressources entre les différentes usines au niveau tactique dans le but de réduire le nombre de celles à acquérir lors de la planification stratégique. Ces modifications ont ainsi permis de définir un problème théorique transposable à d'autres cas moins spécifiques. Au-delà de la réalisation de modèles et méthodes adaptés à ce dernier problème, a été associé à nos travaux de recherche un second objectif industriel. Celui-ci correspond à la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant, certes, l'horizon stratégique mais également les horizons tactiques et opérationnels. Plus précisément, il s'agit de réaliser un ensemble de modèles et de méthodes adaptés à la prise des décisions relatives à ces différents niveaux de planification et facilitant la réalisation des boucles de faisabilité associées.

Compte tenu de ces éléments, nos travaux se rattachent à la thématique du Supply Chain Management (SCM) et plus précisément du Supply Chain Network Design (S.C.N.D.). Ces différents axes de recherche ayant fait l'objet d'un nombre important d'études et de publications, il apparaît important d'en dresser un bon aperçu afin de les comparer à nos travaux et ainsi identifier la valeur ajoutée de ces derniers ; cet aspect faisant l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Le Supply Chain Network Design - état de l’art

Ce chapitre constitue un état de la littérature vis-à-vis de la thématique de Supply Chain Network Design (SCND) à laquelle ont été rattachés nos travaux de recherche. Ainsi, en plus de sa définition et des déclinaisons associées, il présente les différentes études relatives au SCND dans divers contextes. Plus précisément, sont adressés, au cours de parties distinctes, les travaux relatifs au SCND dans un cadre déterministe, dans un cadre incertain ainsi que le dimensionnement de la flexibilité d’une Supply Chain. Partant de cet état de l’art, ce chapitre permet également de montrer l’impossibilité de recourir à des travaux existants afin de résoudre le problème adressé dans ce doctorat.

Sommaire

Chapitre II : Le Supply Chain Network Design - état de l’art	37
1. Introduction	39
2. Le SCND : définition	39
3. Le SCND dans un contexte déterministe	42
3.1. Modèles pour l’implantation des entités d’une Supply Chain.....	42
3.2. Modèles de planification stratégique	44
3.3. Modèles pour le dimensionnement capacitaire	46
3.4. Conclusion	49
4. SCND et incertitude	50
4.1. Prise en compte de l’incertitude	51
4.1.1. Incertitude : définitions et terminologies	51
4.1.2. Les différents modèles	54
4.2. Modèles stochastiques	55
4.3. Modèles robustes	59
4.4. Conclusion	60
5. SCND et flexibilité.....	61
5.1. Caractérisation et utilisation de la flexibilité	61
5.1.1. Définition et classification de la flexibilité	61
5.1.2. Stratégies d’utilisation de la flexibilité.....	63
5.1.3. Terminologie liée à la notion de flexibilité	65
5.2. Modèles d’évaluation	65
5.3. Modèles de dimensionnement	66
5.4. Conclusion.....	72
6. Positionnement de nos travaux au sein de la littérature : conclusion.....	72
7. Conclusion.....	80

Liste des figures

Figure 16 : Découpage des activités d’une Supply Chain (Beamon, 1998).....	40
Figure 17: Evolution du nombre de publications portant sur des Supply Chain ([Botta-Genoulaz, 2005]).....	41
Figure 18 : Distinction incertitude et variabilité	52
Figure 19 : Les différentes sources d’incertitudes [Kibli et al., 2010].....	53
Figure 20 : Types de flexibilité et stratégies associées [Beach, 2000].....	64
Figure 21 : Représentation d’une structure partiellement chaînée.....	68

Liste des tableaux

Tableau 2 : Tableau comparatif des principales références constituant l’état de l’art	79
---	----

1. Introduction

Les travaux présentés dans ce document ont été rattachés, lors du précédent chapitre, à la thématique du Supply Chain Network Design (SCND). Cette dernière a fait l'objet d'un nombre relativement important de recherches dont il convient de donner un aperçu le plus exhaustif possible afin de les replacer dans un contexte général facilitant leur compréhension. Ceci consiste à identifier les principales problématiques considérées, les méthodes de résolutions utilisées ainsi leurs applications. Notons que ce dernier point est relativement important puisqu'il traduit la maturité de la communauté scientifique et industrielle vis-à-vis du SCND en illustrant, ou infirmant, le passage des modèles et méthodes développés du domaine de la recherche pure à des outils effectivement mis en œuvre dans le cadre de problèmes réels. Au-delà de la présentation de la thématique de recherche que représente le SCND, cette phase de constitution d'un état de l'art, le plus exhaustif possible, répond également à la volonté de mettre en évidence les apports issus de nos travaux.

Dans ce contexte, la seconde partie de ce chapitre est dévolue à la définition précise du Supply Chain Network Design ainsi qu'à l'identification des principales problématiques associées en l'occurrence :

- (i) la localisation des entités constituant une Supply Chain (Facility Location Problem, FLP) ;
- (ii) le choix des acteurs rentrant dans la composition d'une Supply Chain (relations clients – fournisseurs) ;
- (iii) la planification long terme et moyen terme des activités d'une Supply Chain et ses différentes déclinaisons (fermeture et ouverture d'entités, réalisation du Plan Industriel et Commercial, réalisation du Programme Directeur de Production,...) ;
- (iv) le dimensionnement capacitaire;
- (v) le dimensionnement de la flexibilité.

Ces divers points sont ensuite étudiés dans la suite de ce chapitre dans différents contextes. Ainsi, la troisième partie est dédiée à la présentation de travaux adressant ces problématiques dans un contexte certain tandis que la quatrième est dévolue à leur étude dans un environnement incertain. Ce dernier point pouvant se traduire par un dimensionnement de la flexibilité du système considéré, la cinquième partie est consacrée à cette notion dans le cadre d'une Supply Chain. A l'issue de l'ensemble de ces parties est proposée une comparaison entre le problème traité dans nos travaux de thèse et ceux étudiés dans les différentes références introduites et, ceci, afin d'évaluer l'opportunité de les utiliser. Ces différents éléments sont ensuite repris à la fin de ce chapitre dans le but d'identifier les éléments devant être ajoutés à la littérature existante afin de satisfaire les objectifs industriels décrits dans le premier chapitre.

2. Le SCND : définition

La notion de Supply Chain est née de l'intégration, par les entreprises, de leurs partenaires au sein de leurs différents processus de prise de décisions. Ceci répond à la nécessité, pour ces dernières, de se regrouper afin d'être plus à même de lutter contre une concurrence grandissante et, ceci, par une meilleure coordination de leurs actions. Afin d'illustrer cet avantage, considérons le cas d'une société de fabrication de biens manufacturés, ayant surdimensionnée son système de

production afin de pouvoir réagir à toute hausse de la demande. Malgré cette surcapacité, cette dernière ne pourra faire face, durablement, à une telle variation du besoin si ses différents fournisseurs ne sont pas eux-mêmes capables d'augmenter leur production. A travers ce court exemple, nous pouvons noter l'importance et l'enjeu que revêt, pour une entreprise, le passage à une « configuration » de type Supply Chain. Comme souligné dans le premier chapitre, un tel système peut être défini comme « un processus intégré au sein duquel intervient un certain nombre d'entités (i.e fournisseurs, fabricants, distributeurs et revendeurs) travaillant ensemble afin d'acquérir des matières premières, convertir ces matières premières en produits finis et livrer ces produits finis aux revendeurs » [Beamon, 1998]. Afin de hiérarchiser ces différentes activités, cet auteur propose d'ailleurs, comme illustré sur la Figure 16, de les classer en deux groupes distincts, à savoir celles relatives à la planification de la production ainsi qu'à la gestion des stocks d'une part et celles portant sur les parties distribution et logistique d'autre part. Les premières couvrent l'intégralité de la construction et du pilotage du système de production mais également la partie approvisionnement ainsi que la gestion des stocks tandis que les secondes, quant à elles, correspondent aux différentes politiques de distribution des produits finis, depuis leur lieu de fabrication jusqu'aux points de distribution et différents clients.

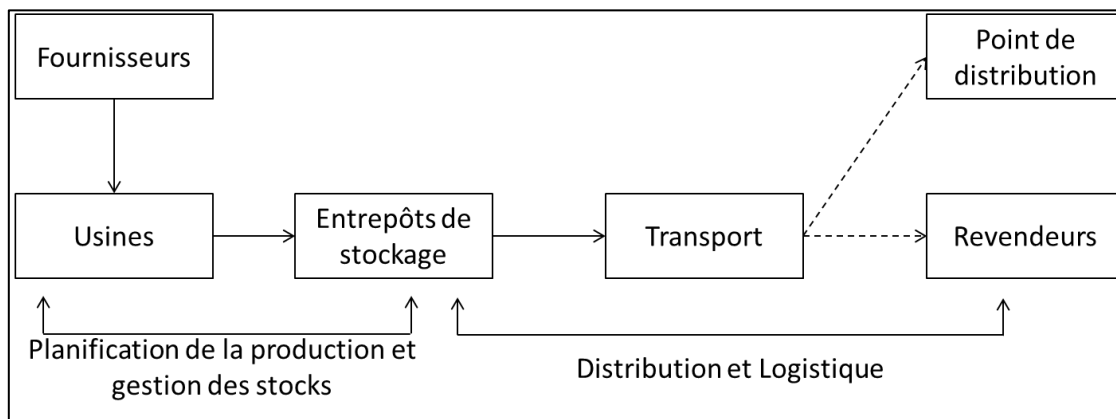


Figure 16 : Découpage des activités d'une Supply Chain (Beamon, 1998)

A travers ce découpage et le schéma de la Figure 16, nous pouvons appréhender la complexité relative à la gestion d'une Supply Chain. En effet, ceci nécessite de considérer un nombre relativement important de problématiques pour lesquelles des décisions doivent être prises en coordination avec tout, ou partie, de l'ensemble des acteurs du système. Ceci a nécessité la définition de mécanismes de prise de décisions clairement établis et fréquents, regroupés sous le terme de Supply Chain Management (SCM). Celui-ci peut être défini comme le processus de pilotage d'une Supply Chain dans son intégralité dans le but de maximiser le profit de l'ensemble du système et, ceci, tout en garantissant le taux de service au client désiré [Simchi-Levi et al., 2004]. Il a ainsi pour but de coordonner les actions des différents acteurs et ne constitue donc pas une simple juxtaposition de leurs décisions individuelles. De par ces caractéristiques, il couvre un nombre important de processus de décisions pour différents horizons de temps. Parmi ceux-ci se trouvent celui désigné sous le terme de Supply Chain Network Design (SCND).

Le SCND peut être défini comme un processus décisionnel intégré traitant l'ensemble des activités (approvisionnement, production, distribution...) d'une Supply Chain [Lin and Wang, 2011]. Adressant un horizon long terme, il est bien souvent considéré comme le fondement de toute activité de SCM [Pishvae et al., 2011]. En effet, il a pour but de dimensionner la Supply Chain afin de garantir sa pérennité et influence, par conséquent, l'ensemble des autres décisions relatives à son pilotage. A ce titre, il constitue le processus de décision ayant le plus d'impact sur son fonctionnement ainsi que sur sa rentabilité [Simchi-Levi et al., 2004]. D'une manière

générale, les décisions prises dans ce cadre peuvent être structurées en trois parties à savoir la construction de la Supply Chain, son dimensionnement ainsi que son organisation. Par construction nous entendons la définition du nombre d'entités ainsi que leur localisation tandis que le dimensionnement se réfère aux décisions relatives à leurs capacités aussi bien en quantité qu'en types d'opérations réalisables ; ce dernier point aboutissant à la définition de la nature des moyens et ressources à acquérir. L'organisation correspond, quant à elle, à l'affectation des productions aux usines ainsi qu'à l'établissement des liens entre les différentes entités. Notons que l'intégralité de ces décisions est prise en considérant des regroupements des différents paramètres. Par exemple, les fournisseurs et clients sont associés à différentes zones de marché tandis que les produits sont regroupés en agrégats ([Vidal and Goetschalckx, 1997]. Remarquons également, que ces différentes décisions sont liées entre elles. Ainsi, par exemple, celles relatives aux investissements (machines, ressources,...), définissant le type d'opérations pouvant être réalisé dans chaque entité, contraignent celles associées à l'affectation des productions et inversement.

Bien que le SCND concerne exclusivement des décisions d'ordre stratégique, il convient lors de sa mise en œuvre de tenir également compte de paramètres plus courts termes. En effet, comme indiqué précédemment, celui-ci a une forte influence sur le résultat opérationnel si bien que ne pas considérer des éléments, tels que les stocks ou encore les coûts logistiques, peut conduire à la définition d'un réseau inadéquat et sous-optimal. Cette nécessité se traduit, d'ailleurs, dans la majorité des fonctions objectifs des modèles proposés dans les articles référencés au cours des parties suivantes. Ces derniers s'inscrivent dans le cadre d'une forte augmentation du nombre de publications relatives à la notion de Supply Chain et, ce, notamment depuis les années 2000 comme illustré sur la Figure 17 (d'après [Botta-Genoulaz, 2005]).

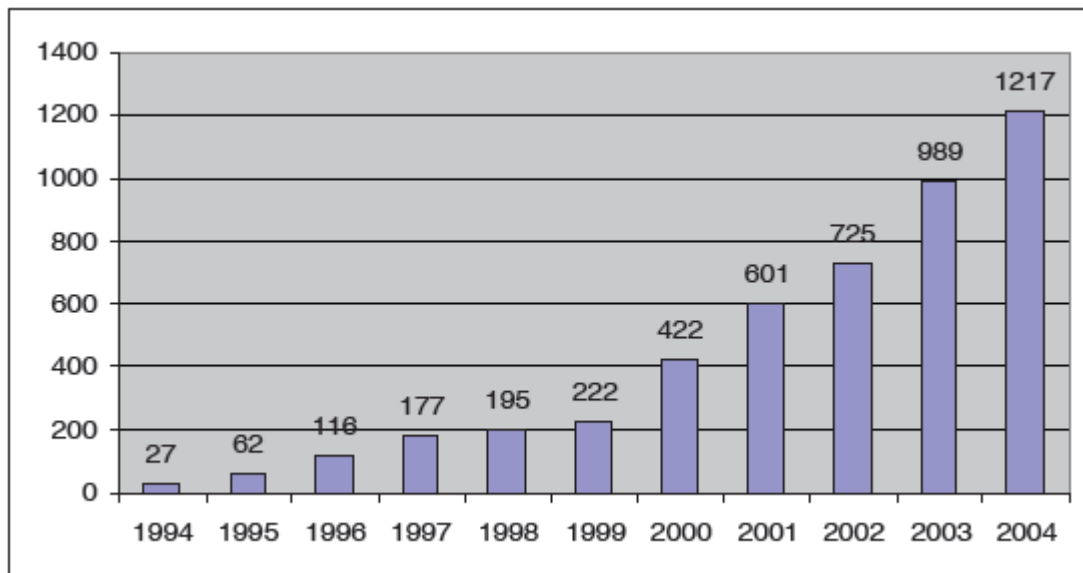


Figure 17: Evolution du nombre de publications portant sur des Supply Chain ([Botta-Genoulaz, 2005])

Par la suite, sont distingués, successivement, les articles traitant du SCND dans le cadre déterministe, dans un contexte incertain ainsi que ceux adressant le problème de dimensionnement de la flexibilité ; une partie étant spécifiquement associée à chacun d'eux. Notons, que l'introduction de ces références a pour objectif de donner une aperçue de l'état de la recherche vis-à-vis du SCND. Plus précisément, il s'agit de mettre en évidence les différentes

thématiques de recherche abordées et les contraintes considérées. Ainsi, cet état de l'art n'a pas pour prétention de constituer une liste exhaustive des articles relatifs au SCND, les références redondantes vis-à-vis des thématiques de recherche abordées n'étant pas présentées.

3. Le SCND dans un contexte déterministe

De nombreux chercheurs et industriels s'accordent sur l'importance et l'aide que peuvent revêtir, dans le cadre du SCND, des méthodes mathématiques comme celles liées à la recherche opérationnelle et à l'optimisation. Dans [Vidal and Goetschalckx, 1997], les auteurs soulignent d'ailleurs la complémentarité entre ces approches et d'autres plus analytiques et quantitatives. Ainsi, ils indiquent que ces dernières doivent permettre aux décideurs d'envisager et de sélectionner différentes solutions avant d'en choisir une, par le recours à des modèles spécifiques relevant de la recherche opérationnelle. Ce constat étant largement partagé au sein de la communauté scientifique, de nombreuses recherches ont été menées afin de proposer des méthodes de résolution et d'aide à la décision pour des problèmes relatifs au SCND. Les premières l'ont été dans un contexte déterministe, c'est-à-dire un contexte dans lequel toutes les données nécessaires à la résolution d'un problème ainsi qu'à la prise de décisions sont supposées connues précisément [Beamon, 1998]. Ces recherches diffèrent de par l'importance et le type de décisions considérées. Plus précisément, peuvent être discriminés les articles traitant uniquement du choix des lieux d'implantations des différentes entités d'une Supply Chain, ceux abordant également des paramètres relatifs à la planification long terme des différentes activités ainsi que les recherches traitant du dimensionnement capacitaire d'un tel système ; cette classification étant utilisée au cours des trois parties suivantes.

3.1. Modèles pour l'implantation des entités d'une Supply Chain

Les premiers travaux relatifs au SCND dans un contexte déterministe ont porté uniquement sur le problème de localisation d'entités parmi un ensemble de choix possibles [Mirchandani and Francis, 1990]. Ceux-ci sont désignés sous le terme de « Facility Location Problem » (FLP) et considèrent, en général, une unique période et une Supply Chain à un niveau. Comme indiqué dans [Klose and Drexel, 2005], établissant un état de l'art sur ce sujet, plusieurs déclinaisons de cette thématique de recherche peuvent être trouvées selon qu'elles tiennent compte de contraintes de capacités ou non ; ces sous-groupes étant désignés respectivement sous les termes « Capacitated Facility Location Problem » (CFLP) et « Uncapacitated Facility Location Problem » (UFLP). A ces différents problèmes peut également être adjointe une contrainte imposant de satisfaire chaque zone marché par une unique entité, ce qui correspond alors, respectivement, au « Capacitated Facility Location Problem with Single Sourcing » (CFLPSS) et « Uncapacitated Facility Location Problem with Single Sourcing » (UFLPSS).

Depuis la première formulation relative aux problèmes de type FLP, définie par Balinski [Balinski, 1961], de nombreuses extensions ont été proposées. Celles-ci correspondent, par exemple, à la prise en compte de différentes périodes de temps ou encore à la considération de plusieurs niveaux au sein de la Supply Chain [Kaufman et al., 1977]. Ainsi, dans [Geoffrion and Graves, 1974] est proposé un MILP pour le problème de dimensionnement du système de production d'une Supply Chain. Ce modèle a pour but de déterminer les différents points de distribution à ouvrir, dans le cadre d'un système composé également de plusieurs usines et zones clients, afin de satisfaire la demande d'une unique période tout en minimisant les coûts fixes d'ouverture et variables d'utilisation de ces différentes entités. Celui-ci est résolu par le recours à une méthode de décomposition de Benders [Benders, 1962]. Une telle approche consiste, tout d'abord, à séparer le problème considéré en un problème « maître », constitué d'un sous-

ensemble de contraintes, ainsi que de sous-problèmes, dits « esclaves », associés chacun à une partie des variables. Ensuite, par une succession de résolutions de ces instances, différentes contraintes sont générées et ajoutées jusqu'à satisfaire un critère de convergence donné. Celui-ci correspond à l'obtention d'un écart satisfaisant entre la borne inférieure, associée à la fonction objectif du problème maître mis à jour, et la borne supérieure, obtenue de par la résolution des problèmes esclaves. Notons que cette méthode suppose une structure particulière du modèle considéré permettant, notamment, de découpler les différentes contraintes vis-à-vis des variables. Depuis cette première utilisation pour la résolution d'un problème de SCND proposé dans [Geoffrion and Graves, 1974], cet algorithme a été mis œuvre dans un nombre relativement important de travaux (voir par exemple [Geoffrion et al., 1978]; [Geoffrion et al., 1982]; [Santoso et al., 2005] ou encore [Bihandi and Yusuff, 2011]). Celui-ci a notamment été utilisé afin de résoudre un problème industriel, à savoir celui relatif à l'entreprise agroalimentaire NABISCO [Brown et al., 1987]. Ce dernier correspond au choix de l'implantation des usines de cette entreprise, de l'affectation de ressources spécifiques, permettant la fabrication de produits particuliers, ainsi que l'affectation à ces dernières de zones de consommation. Ces différentes décisions sont prises au regard des coûts fixes, d'utilisation des usines et d'implantation des ressources, et variables relatifs à la production ainsi qu'au transport des marchandises. Comme indiqué ci-dessus, le modèle ainsi obtenu est résolu à l'aide d'un algorithme de décomposition de type Benders. Cependant, celui-ci est couplé avec une méthode de programmation par objectif. Plus précisément, au problème maître est adjoint un ensemble de contraintes, associées à des objectifs de production, pouvant être violées ; ceci entraînant alors l'apparition de pénalités au sein de la fonction objectif. A travers un exemple numérique, les auteurs montrent les avantages offerts par une telle approche vis-à-vis de la méthode de décomposition de Benders initiale.

Un autre exemple d'utilisation de la méthode de décomposition de Benders, dans le cadre d'un problème de type FLP, peut également être trouvé dans [Cordeau et al., 2006]. Celui-ci propose une formulation, du problème de construction d'une Supply Chain, relativement générale et applicable dans de nombreux contextes. Celle-ci prend la forme d'un MILP monopériode consistant à déterminer la localisation des différentes entités ainsi que les moyens de transport à privilégier dans une Supply Chain à trois échelons. Dans ce contexte, l'objectif associé correspond à une minimisation des différents coûts fixes d'utilisation des usines et entrepôts et variables de production ainsi que de transport des produits. De plus, différentes extensions sont introduites sans pour autant qu'aucune d'elles ne soient mises en œuvre. Afin de résoudre ce modèle, deux méthodes sont proposées à savoir, comme indiqué précédemment, un algorithme de décomposition de Benders mais également un Branch&Bound; le premier présentant de meilleurs résultats sur les instances de plus grandes tailles testées. De plus, différentes coupes, prenant la forme d'inégalités, sont adjointes au problème afin d'améliorer les temps d'exécution et, ceci, quelle que soit la méthode de résolution utilisée.

Bien qu'intéressantes, ces différentes approches sont limitées par le faible nombre d'aspects relatifs à la construction d'une Supply Chain considérés. Ainsi, ces derniers n'intègrent pas, à de rares exceptions près, des éléments tels que le dimensionnement de ressources ou encore la circulation des différents flux au sein du système. Par conséquent, ils ne peuvent être utilisés dans le cadre d'études portant sur des problèmes réels de construction et de dimensionnement. Dans le but de pallier ce manque, et partant de ces différentes études, d'autres recherches ont été menées afin de considérer également d'autres paramètres liés à la planification long terme des différentes activités d'une Supply Chain.

3.2. Modèles de planification stratégique

Outre les décisions relatives à la localisation des différentes entités d'une Supply Chain, d'autres paramètres du SCND ont également fait l'objet de travaux de recherche et, notamment ceux relatifs à la planification long terme des activités. Ainsi, Williams [Williams, 1981] a proposé un ensemble d'heuristiques pour la résolution de problèmes de planification au sein de réseaux. Ces derniers peuvent correspondre respectivement à un ensemble de machines reliées entre elles au sein d'une même usine, de points de stockages et d'entrepôts ou bien d'usines et de points de distribution ; leur point commun étant de partager une structure arborescente particulière. Ainsi, ces méthodes peuvent être utilisées afin de résoudre des problèmes de planification de la production et de distribution au sein d'une Supply Chain. Dans ce contexte, ces heuristiques ont toutes pour objectif de minimiser les différents coûts de stockage et de distribution ; tout en assurant la pleine satisfaction de la demande sur un ensemble de périodes. A travers la génération d'instances de problèmes de planification, une classification de ces méthodes de résolution approchées est proposée.

Dans [Cohen et al., 1989], les auteurs s'intéressent, quant à eux, au problème du choix des fournisseurs ainsi que de la part de la demande à satisfaire dans le cadre d'une Supply Chain. Partant d'un réseau de production ainsi que d'un ensemble de zones clients, leur modèle a pour but de sélectionner des fournisseurs, ainsi que de déterminer les quantités à produire au sein de chaque usine et celles à livrer à chaque marché et, ceci, dans le but de maximiser le profit. Ces travaux sont parmi les premiers à avoir considéré, en plus des coûts, des paramètres tels que la durée des contrats ou encore les volumes limites à délivrer comme des éléments pouvant influencer le choix des fournisseurs. Ils ont été simplifiés dans [Cohen and Lee, 1989] où les auteurs proposent un modèle pour l'établissement des liens entre fournisseurs et points de distributions et points de distribution et zones client au sein d'une Supply Chain à trois niveaux où aucune sélection ne doit être effectuée. En plus de ces décisions, est également réalisée une planification de la production ainsi que de la distribution, sur l'unique période considérée, dans le but de maximiser le profit correspondant à la différence entre le chiffre d'affaire issu des ventes et les différents coûts et taxes. Une des particularités de leur modèle est d'être basé sur le principe de quantités économiques à produire. De plus, ils intègrent des contraintes issues de négociations telles que des volumes minimum à fabriquer dans un pays afin de pouvoir y vendre ses produits. Bien que ce modèle soit adapté à la prise en compte d'une seule, celui-ci est utilisé afin de résoudre un problème à plusieurs périodes par l'association à chacune d'elles d'une instance particulière ; les énoncés résultants étant alors résolus séquentiellement.

Ces études présentées dans [Cohen et al., 1989] et [Cohen and Lee, 1989], bien que plus complètes que les recherches relatives au FLP dans sa version la plus simple, n'intègrent pas de décisions de localisation d'entités. Cet aspect est, par contre, considéré dans [Hinojosa et al., 2000] où un modèle multi-périodes pour le problème de dimensionnement d'une Supply Chain à deux niveaux est défini. Partant d'une situation initiale en termes d'usines et d'entrepôts, celui-ci a pour but de déterminer, parmi ces entités, celles à fermer et à l'inverse les lieux où en ouvrir de nouvelles et, ceci, dans le but de minimiser l'intégralité des coûts. Ces derniers correspondent aux coûts fixes d'ouverture des entités ainsi que ceux relatifs au transport et à la production, tandis que la demande de chacune des zones clients identifiées doit être obligatoirement satisfaite. A cette contrainte s'ajoute un nombre minimum d'entités devant être ouvertes en début et fin de période. Le modèle ainsi obtenu est résolu à l'aide d'une heuristique consistant à rendre réalisable une solution du problème relaxée obtenue à partir d'une relaxation Lagrangienne. Bien qu'intéressant, cet article souffre d'un certain nombre d'hypothèses restrictives. Par exemple, aucune notion de stocks n'est introduite ; la demande devant être satisfaite par la production de la période courante. De plus, aucun coût de fermeture ni d'ouverture des usines et entrepôts n'est explicitement considéré. Un problème similaire est adressé dans [Jayaraman et Pirkul, 2001] où les

auteurs proposent un modèle pour l'affectation entrepôts-zones clients, usines-entrepôts et enfin fournisseurs – usines dans le cadre d'une Supply Chain multi-produits. Ce dernier est résolu à l'aide d'une heuristique constituant l'originalité de leurs travaux. Celle-ci consiste, tout d'abord, à réaliser une relaxation Lagrangienne afin de déterminer les entrepôts et usines à ouvrir. Partant de ces éléments, un problème d'affectation des entrepôts aux zones clients est défini afin de minimiser les coûts de transport. Ceci définissant la demande au sein de chaque entrepôt, le problème de planification de la production résultant est résolu. Celui-ci consiste alors à déterminer la quantité de chaque produit à fabriquer, au sein de chaque usine ouverte, ainsi qu'à définir les flux de matières premières entre ces dernières et les différents fournisseurs dans le but de minimiser l'ensemble des coûts. Partant de ces éléments, définissant une borne supérieure sur les quantités pouvant être produites par chaque usine, le problème de minimisation de l'affectation usine-entrepôt est résolu avec pour but de satisfaire la demande à coût minimum. Lors de cette optimisation, les affectations clients - entrepôts réalisées à la première étape peuvent alors être modifiées. Bien que satisfaisante cette méthode, dont l'efficacité est illustrée à travers différents exemples numériques, ne peut être utilisée dans le cas de problèmes réels. En effet, seulement une unique période est considérée tandis que la totalité de la demande doit être satisfaite alors même que ceci n'est pas obligatoirement désirable dans le cadre de la recherche du profit maximum. De plus, à chaque zone client doit être affectée exactement un entrepôt, ce qui là aussi s'avère illusoire dans le cadre de nombreuses chaînes logistiques. Une autre méthode de résolution approchée, pour la résolution d'un problème d'affectation est proposée dans [Altıparmak et al., 2009]. Celle-ci, prenant la forme d'un algorithme génétique, a pour but d'établir l'affectation des fournisseurs ainsi que des distributeurs dans une Supply Chain à trois niveaux. L'originalité de leurs travaux réside dans la représentation matricielle des solutions ainsi que dans les méthodes de croisement utilisées. Cependant, cette méthode est appliquée pour une unique période de temps tandis qu'à chaque client doit être affecté exactement un distributeur, ce qui s'avère trop restrictif dans bien des cas.

Une autre approche intéressante relative aux problèmes d'affectation est proposée dans [Gebennini et al., 2009]. Au sein de celui-ci est défini un modèle pour le dimensionnement des stocks de sécurité ainsi que du réseau d'approvisionnement et de distribution d'une Supply-Chain. Outre les décisions relatives au choix des fournisseurs et des points de distribution à ouvrir, est également réalisée une affectation de ces derniers aux zones client. Dans leur cas, ce dernier aspect est réalisé dans le but de garantir la présence de suffisamment de stocks afin de satisfaire la demande. Malgré cette approche intéressante de dimensionnement, ce modèle est limité par le fait qu'une seule usine ainsi qu'un unique produit soient considérés. La planification concerne donc l'intégralité de la Supply Chain mais relativement à un seul élément à fabriquer et distribuer.

La majorité des travaux présentés jusqu'à présent sont statiques dans le sens où ils ne considèrent qu'une période ou bien un ensemble de périodes pour lesquelles la totalité des décisions d'ordre stratégiques sont figées. Cette limite est palliée dans (Melo et al., 2005). Dans cet article est défini un modèle linéaire pour le dimensionnement ainsi que la planification dynamique d'une Supply Chain. Partant d'une situation initiale, leur modèle détermine les unités de production à ouvrir ainsi que celles à fermer au cours des différentes périodes afin de satisfaire la demande à coût minimum. Ceci est réalisé par le biais de transferts de capacités entre les différentes entités. Ces derniers sont contraints par un budget maximal transférable d'une période à l'autre. Une des limites du modèle ainsi proposé est de considérer que chaque usine est capable de produire n'importe quel produit. Autrement dit, l'affectation de la production n'est pas vue comme une décision stratégique, nécessitant des investissements relativement importants, mais plutôt comme une variable d'ajustement. Ce caractère dynamique des décisions, dans le cadre de problèmes purs de localisations d'entités a également été considéré dans ([Erlenkotter, 1981]; [Shulman, 1991] et [Daskin et al., 1992]).

Ces différentes approches constituent donc un enrichissement non négligeable des problèmes initiaux de localisation d'entités. Cependant, alors même que leur utilisation dans un contexte industriel peut être envisagée, celle-ci est limitée par l'absence de prise en compte d'un paramètre important, dans le cadre de la construction d'une Supply Chain, en l'occurrence le dimensionnement des différentes capacités.

3.3. Modèles pour le dimensionnement capacitaire

Malgré le nombre important de paramètres examinés ; les études introduites au cours des deux parties précédentes ne considèrent pas l'un des éléments les plus importants du SCND, à savoir le dimensionnement capacitaire. En effet, cet aspect est reconnu, depuis très longtemps, comme une décision stratégique cruciale [Elson, 1972]. Cependant, sa prise en compte explicite dans le cadre de travaux de recherche est relativement récente. Celle-ci s'est effectuée de deux manières différentes, à savoir en considérant les capacités envisageables, pour les différentes entités constituant le système considéré, comme un ensemble continu ou bien discret. Notons que, selon-nous, la seconde approche semble être la plus pertinente. En effet, en général, l'apport de capacités est issu de l'ajout de ressources, à chacune desquelles est associé un nombre maximum de produits pouvant être fabriqués lors d'une même période. Par conséquent, le dimensionnement correspondant ne peut évoluer que par paliers et non d'une manière continue. Cette problématique est souvent désignée, au sein de la littérature scientifique, sous le terme « extension de capacités (capacity expansion) ». Celle-ci est corrélée avec le problème de localisation d'entités comme illustré dans [Verter and Dincer, 1992] où ces liens sont mentionnés et étudiés. L'un de ces auteurs a d'ailleurs proposé, quelques années plus tard, un modèle ainsi qu'une démarche de résolution analytique adressant cette problématique [Verter, 2002]. Ceux-ci ont pour but de déterminer, dans le cadre d'une Supply Chain à deux niveaux, le nombre d'usines et d'entrepôts à ouvrir ainsi que leurs emplacements mais également le nombre et le type de technologies à installer au sein de chaque unité de production parmi un ensemble prédéfini. L'objectif associé correspond à la minimisation des coûts fixes d'ouverture des entités ainsi que variables de production et de transport ; la demande devant être obligatoirement satisfaite. Une des particularités de ces travaux est la prise en compte de coûts de fabrication concaves permettant de représenter les économies d'échelles issues d'une production massifiée. Cependant, ceux-ci sont difficilement applicables dans un cas réel notamment de par la considération d'une unique période de temps ainsi que l'interdiction de produire plus d'un type de produits au sein d'une même usine.

Dans [Bhutta and al., 2003] est également adressé la thématique d'extension des capacités et, ceci, dans le cadre d'un système de production multi-sites. Cet article a la particularité d'inclure, outre les habituels coûts de production, des éléments extérieurs tels que les taux de change. Ainsi, est proposé un MILP multi-périodes consistant à ajuster, à la hausse comme à la baisse, les capacités d'un réseau d'usines existant ainsi qu'à planifier la production et le transport des produits, dans le but de maximiser le profit. Ce dernier est représenté comme la différence entre le chiffre d'affaire issu des ventes et les coûts opérationnels. Notons qu'ici, comme dans beaucoup d'autres articles, l'extension des capacités est vue d'avantage comme une décision d'ordre tactique et suppose ainsi que celles-ci soient facilement ajustables en fonction de la demande. Le modèle proposé n'est donc pas transposable à de nombreux problèmes de SCND pour lesquels un tel dimensionnement relève d'une décision long terme requérant des investissements conséquents et non modifiables dans un délai relativement court. A l'inverse, il peut être mis en œuvre dans le cadre d'extensions de capacités réalisées par l'intermédiaire du recours à des employés intérimaires ou à des heures supplémentaires. En effet, dans ce cas, une modification fréquente des capacités peut être envisagée et constitue, à ce titre, une décision d'ordre tactique.

Une telle approche, consistant à adresser le problème d'extension des capacités dans un contexte moyen terme et non long terme, peut être retrouvée dans [Paquet et al., 2008] où un modèle (MILP) relativement complet est proposé. Ce dernier, constituant un enrichissement de celui défini dans [Paquet et al., 2004], couvre les décisions d'ouverture et de fermeture d'usines, l'extension de capacités ainsi que la planification de la production et de la distribution au sein d'une Supply Chain à trois échelons. Le dimensionnement capacitaire est réalisé à travers l'affectation, aux unités de production, d'un ensemble de ressources de deux types, à savoir des machines et des ouvriers. Ces derniers sont différenciés selon leur qualification tandis que leur quantité varie d'une période à l'autre. En effet, initialement, un certain nombre d'entre eux est affecté à chaque usine. Ensuite, en fonction des besoins propres à chaque période, d'autres peuvent être embauchés ou au contraire licenciés ; le but étant de minimiser les coûts associés à ces actions ainsi qu'à la masse salariale. De plus, ceux-ci peuvent être transférés, dans une certaine limite, entre sites de production au cours de l'horizon de planification ; ceci induisant alors des coûts de transferts spécifiques. En ce qui concerne les machines, les mêmes types d'opérations sont considérées ; c'est-à-dire qu'elles peuvent être vendues, achetées ou transférées entre les périodes et, tout ceci, dans une certaine limite imposée par des bornes maximales. Dans ce contexte, l'objectif de leur modèle est de construire un système de production et d'établir un plan d'utilisation des ressources permettant de satisfaire la demande, tout en minimisant les différents coûts. Outre ceux présentés ci-dessus, sont également considérés d'autres relatifs à l'achat et au transport des matières premières ainsi qu'à leur transformation. Le modèle ainsi obtenu est résolu à l'aide du solveur Cplex ; des contraintes de coupe spécifiques étant ajoutées afin d'accélérer les temps d'exécutions. Remarquons, que ces travaux sont spécifiques au cas de systèmes de production de type make-to-order, aucune notion de stocks n'étant considérée. De plus, il est important de noter que les applications numériques proposées comprennent un faible nombre de données, la plus importante étant constituée de 6 produits et de ses 89 composants, le tout sur 3 périodes.

Dans [Amrani et al., 2011] une autre approche de dimensionnement capacitaire est proposée. Celle-ci consiste à déterminer les configurations à établir au sein de chaque entité, qu'elle soit initialement construite ou non. Par configuration, auxquelles sont adjoints des coûts fixes d'installation et variables d'utilisation, sont désignés la capacité ainsi que les types de produits pouvant être réalisés. Outre cet aspect, le modèle proposé consiste également à déterminer la localisation des différentes entités, à effectuer une planification de la production ainsi que de la distribution pour un unique horizon de temps. Une des particularités de ces travaux est de prendre en compte des coûts concaves, permettant de représenter les phénomènes d'économies d'échelles. De plus, un moyen alternatif de distribution est introduit à savoir le transport des produits directement depuis les usines, c'est-à-dire sans passer par les points intermédiaires que constituent les entrepôts. Bien que monopériode, le modèle ainsi obtenu s'avère relativement difficile à résoudre pour des problèmes de grandes tailles. Ainsi, les auteurs proposent une heuristique basée sur celle proposée dans [Mladenovic and Hansen, 1997] à savoir la « Variable Neighborhood Search Heuristic (VNS) » à laquelle est adjointe une recherche tabou. Plus précisément, leur méthode consiste à définir un ensemble de systèmes de voisinages puis à y recourir successivement afin de générer, à chaque itération, une solution à partir de celle obtenue précédemment. La « recherche tabou » est alors utilisée afin d'interdire certaines opérations déjà réalisées pour un système de voisinage donné. Par une comparaison sur un certain nombre de tests de leurs résultats avec ceux obtenus à l'aide de Cplex, les auteurs montrent l'efficacité de leur méthode. Remarquons qu'afin de pouvoir utiliser ce solveur une technique de linéarisation par morceaux a dû être mise en œuvre afin de s'affranchir des coûts concaves.

Plus récemment, [Carle et al., 2012] ont proposé un modèle pour le problème de Supply Chain Network Design couvrant à la fois les horizons long et moyen termes. Plus précisément, deux types de périodes sont considérés. Les premières correspondent au périmètre stratégique

pour lesquelles des décisions relatives au choix des fournisseurs, à la localisation et au dimensionnement capacitaire des entités (usines, entrepôts), ainsi qu'à l'établissement des liens entre ces dernières sont prises. Celles-ci sont elles-mêmes composées de micro-périodes correspondantes à l'horizon tactique. Dans le cadre des décisions prises au niveau supérieur, sont alors définis les plans de production, de distribution et d'approvisionnement. Afin de résoudre ce modèle, une métaheuristique multi-agents est proposée dont l'efficacité est illustrée à travers différents exemples. Ce principe de différenciation des horizons de temps en fonction des décisions prises (stratégiques ou tactiques) a été repris dans [Badri et al., 2012]. Dans celui-ci, les investissements d'agrandissements et d'ouverture d'usines, décidés au niveau stratégique, sont contraints par le profit cumulé ainsi que le budget pouvant être apporté par l'extérieur (emprunts,...) à la macro période considérée. Afin de résoudre le modèle proposé, une relaxation Lagrangienne est développée.

En plus de ces études, décidant explicitement du dimensionnement capacitaire d'entités, d'autres recherches ont adressé ce problème d'une manière indirecte. Ceci est par exemple le cas de [Cordeau et al., 2006] référencé précédemment, où celui-ci est abordé à travers la définition du nombre de moyens de transports à utiliser ; ceci déterminant les volumes de produits pouvant être acheminés entre les différentes entités. Une telle approche est également mise en œuvre dans [Correia et al., 2012] où est proposé un MILP pour le problème de SCND dans le cadre d'un réseau de distribution multi-sites à deux étages. Les décisions concernent l'implantation des entrepôts ainsi que leur dimensionnement capacitaire. Ce dernier se traduit par l'installation de zones de stockages parmi un ensemble possible, celles-ci ayant des capacités différentes et étant spécifiques à certains produits. L'originalité de leur travail réside dans l'étude de l'impact de la fonction objectif sur les résultats obtenus. Ainsi, ils montrent qu'il est préférable de chercher à maximiser le profit total plutôt que de minimiser les coûts; ce dernier imposant à l'inverse du précédent la satisfaction pleine et entière de la demande. En effet, à travers les différents tests réalisés, il apparaît que le premier de ces objectifs permet d'obtenir des résultats de meilleurs qualités que le second et ceci en des temps généralement plus faibles.

Parmi les différents modèles traitant du problème d'extension de capacités, un certain nombre considère l'aspect dynamique d'une Supply Chain qui correspond, comme indiqué précédemment, à la prise en compte de la nécessaire adaptation d'un tel système en fonction des spécificités de chaque période. Ceci peut, en plus des éléments déjà introduits, prendre la forme d'une considération de la production de nouveaux produits, lors de futures périodes, ou encore des potentiels transferts de volume entre usines; ce dernier point correspondant à une modification de la répartition de la fabrication d'un même produit entre différentes unités de production. Cet aspect a été relativement bien étudié à l'inverse du transfert de la capacité à produire. Ceci correspond à la modification des caractéristiques d'un site de production, ou d'une autre entité, afin de lui apporter la possibilité technique de fabriquer un nouveau type de produits, ou de réaliser une autre tâche, qu'il n'était pas capable d'effectuer initialement. Ceci, désigné également sous le terme de modification des capacités techniques, prend en général la forme de transferts de ressources, disponibles en quantités limitées, entre unités. Ceci est fréquemment mis-en-œuvre dans le cadre d'entreprises industrielles nécessitant des machines coûteuses et/ou rares où il apparaît parfois plus rentable d'effectuer des transferts de ces dernières entre les entités plutôt que d'en acquérir beaucoup. Notons que ces ressources sont en générales des machines mais peuvent également correspondre à des ouvriers très qualifiés. Malgré l'intérêt qu'elle présente, cette opportunité a fait l'objet de peu de recherches. Ainsi, à notre connaissance, en dehors de [Paquet et al., 2008], très peu d'articles, considère le transfert de ressources, dans le cadre du SCND, comme un levier à prendre en compte afin réduire les différents investissements. Quelques autres études ont été réalisées à ce sujet mais dans un contexte moyen terme. Dans ce cadre, les décisions concernent soit uniquement l'affectation des ressources soit couvrent également leur achat ainsi que leur vente à chaque période.

A première vue anodin, le fait de considérer la possibilité d'ajuster périodiquement lors de la planification tactique le nombre total de ressources sous-entend des hypothèses importantes. En effet, ceci suppose que ces ressources ne soient pas spécifiques à une entreprise et qu'elles puissent être facilement vendables mais également que leurs coûts ne soit pas trop élevés afin que leurs achats puissent être envisagés dans le cadre d'une planification moyen, voire court, terme. Ceci souligne la nécessité de considérer différents types de ressources à savoir celles spécifiques à une entreprise et/ou onéreuses dont le dimensionnement fait partie intégrante du SCND et celles plus communes et moins coûteuses à gérer dans le cadre de la planification tactique avec pour unique contrainte le respect d'un budget maximum périodique. Ainsi, par exemple, Aghezzaf [Aghezzaf, 2007] aborde cet aspect par la considération d'un système de production composé d'usines ayant la capacité de fabriquer différents produits à la condition de disposer de moules spécifiques. Ces derniers, étant en quantités restreintes, limitent donc le nombre d'usines pouvant fabriquer un même type de produits lors d'une même période. Cependant, entre ces dernières, des transferts de ces ressources sont autorisés, si bien que la planification consiste à établir les quantités à produire au sein de chaque usine ainsi que le plan d'affectation périodiques des moules disponibles. De plus, le MILP proposé a également pour objectif de déterminer les entrepôts à ouvrir et ceux à fermer à chaque période, le but étant de satisfaire la demande à coût minimum. Bien qu'intéressante, cette approche souffre d'une hypothèse relativement forte à savoir le fait que les produits puissent être fabriqués dans toutes les usines à la condition de disposer des moules adéquats. Autrement dit, les capacités techniques sont uniquement spécifiées à travers la possession de ces ressources et non de celle de machines non transférables. Un autre exemple de prise en compte de tels transferts dans le cadre de la planification tactique peut être trouvé dans [Wang and Chen, 2009]. Dans celui-ci différents modèles non linéaires, résolus à l'aide d'un algorithme de colonies de fourmis, sont proposés. L'objectif de ces derniers est d'établir un plan d'utilisation des ressources au sein de deux usines ; les capacités provenant de celles non utilisées au sein d'une de ces unités de production pouvant être allouées à l'autre. Plus précisément, la méthode consiste à déterminer le nombre de ressources utilisées, vendues, louées et achetées au sein de chaque usine à chaque période. De plus, les coûts associés à ces opérations étant sujets à variation une valeur est définie pour chacune d'elles. Comme indiqué précédemment, cette approche souffre d'hypothèses trop restrictives pour pouvoir être utilisée dans le cadre du SCND. Ainsi, outre l'horizon de temps considéré, le fait que le nombre de ressources puisse varier d'une période à l'autre interdit sa mise en œuvre dans le cadre d'un processus long terme où un tel dimensionnement revêtirait des coûts relativement importants.

3.4. Conclusion

Au cours de cette partie ont été introduits différents travaux relatifs au SCND dans un contexte déterministe, c'est-à-dire dans lequel les données servant de support aux différents processus de décision sont supposées connues précisément. Ceux-ci ont été différenciés en fonction des différents éléments considérés. Ainsi, ont été distingués les modèles relatifs à la localisation des entités d'une Supply Chain, ceux adressant également des aspects relatifs à la planification long terme des différents flux ainsi que ceux traitant du dimensionnement capacitaire.

Comme indiqué au cours de cette partie, les modèles traitant uniquement de la localisation d'entités constituent les prémisses des études relatives au SCND. Ceux-ci, désignés sous le terme de « Facility Location Problem » (FLP) [Klose and Drexler, 2005], ne peuvent être utilisés afin de résoudre des problèmes industriels réels de par le faible nombre de paramètres considérés. Ils ont ainsi été étendus afin de traiter des aspects relatifs à la planification long terme des flux au sein d'une Supply Chain, comme indiqué au sein de la partie 3.2. Ainsi, ont été référencés un certain nombre de modèles permettant de traiter des problèmes réels ([Cohen et al., 1989], [Jayaraman et

Pirkul ,2001], [Altıparmak et al., 2009]...). Cependant, ceux-ci n'abordent pas un élément important du SCND à savoir le dimensionnement capacitaire si bien qu'ils ont été eux-aussi étendus afin d'aboutir aux différentes recherches mentionnées au sein de la partie 3.3. Comme illustré, ceux-ci concernent différents types de capacité, à savoir des capacités dont le nombre peut être ajusté périodiquement, telles que des employés, et d'autres nécessitant des investissements long terme conséquents comme des machines. Notons que cette seconde catégorie correspond à des ressources dont le nombre ne peut être ajusté périodiquement si bien que leur dimensionnement relève réellement d'une décision long terme impactant la rentabilité de la Supply Chain considérée. Bien que, dans le cadre de nos travaux de recherche, soient considérées des ressources de ce type, les modèles précédemment introduits ([Verter, 2002], [Amrani et al., 2011], [Carle et al., 2012], [Badri et al., 2012],...) traitant de leur dimensionnement ne peuvent être utilisés afin de résoudre notre problème. En effet, comme indiqué précédemment, aucun d'eux n'aborde leur transfert comme un élément à considérer dans le cadre d'une planification stratégique. Les seuls à adresser cette possibilité ([Paquet et al., 2008]) font l'hypothèse de ressources du premier type c'est-à-dire dont le nombre peut être ajusté périodiquement, ce qui interdit leur utilisation dans notre cas.

Outre ces différents aspects, une autre caractéristique importante, relative à l'ensemble des travaux introduits au cours des trois parties précédentes, interdit leur utilisation afin de résoudre le problème adressé dans le cadre de ce doctorat. Celle-ci correspond à leur caractère déterministe, c'est-à-dire au fait que l'intégralité des données, utilisées afin de prendre des décisions, est supposée connue avec certitude. En effet, comme indiqué précédemment, un des aspects de nos travaux est de tenir compte de la fiabilité des données prévisionnelles afin de refléter le contexte réel dans lequel évolue bon nombre d'entreprises. En effet, depuis plusieurs années, l'environnement économique n'a cessé d'évoluer pour aboutir à un marché très concurrentiel. Ceci s'est traduit par une difficulté à prévoir les niveaux de demande futurs ainsi que l'acceptation des produits par les consommateurs. Ceci, ajouté aux potentiels aléas liés à la production, la distribution ou aux fournisseurs, telles que des pannes machines ou des grèves conduisant à des ruptures d'approvisionnement de matières premières, a ainsi rendu très importante la prise en compte de l'incertitude relative aux différentes données prévisionnelles utilisées. Notons que ce constat, de la nécessaire prise en compte de l'incertitude relative aux données prévisionnelles, est partagé par de nombreux chercheurs comme en atteste les références introduites dans la partie suivante. Cependant, avant de s'intéresser à cet aspect dans le cadre du SCND, précisons que les travaux présentés dans ce chapitre ont été choisis afin de refléter l'état de la recherche relative à cette problématique dans un contexte déterministe. Ainsi, ils ne constituent pas une liste exhaustive ; le lecteur intéressé pouvant se référer aux différents états de l'art relatifs à ce sujet tels que [Vidal and Goetschalckx, 1997]; [Beamon, 1998]; [Klose and Drexler, 2005]; [Meixel and Gargeya, 2005] ainsi que [Shen, 2007].

4. SCND et incertitude

Le Supply Chain Network Design concerne un nombre relativement important de décisions. Celles-ci, mentionnées dans la première partie de ce chapitre, ont toutes été considérées dans l'ensemble des références indiquées précédemment. Cependant, elles l'ont été dans un cadre déterministe ne reflétant pas la réalité. En effet, à l'horizon long terme dans lequel s'intègre le SCND, il est difficile, voire même impossible, de déterminer précisément la valeur des différentes données, telles que la demande ou encore le coût des matières premières, supportant ce processus de décisions. Or, selon la valeur réelle de ces dernières, une solution initialement optimale pourra ne plus l'être et même s'avérer totalement inadaptée. A ceci s'ajoute le fait que la

mise en œuvre et la modification des décisions prises dans le cadre du SCND sont relativement coûteuses et demandent beaucoup de temps. Aussi, tout changement de l'environnement vers une situation non prévue sera difficile à pallier. Par conséquent, il apparaît indispensable de tenir compte de l'incertitude, relative aux différents éléments de décisions, afin de construire une solution robuste sous peine d'être trop vulnérable aux fluctuations des contextes politique et économique [Pishvae et al., 2011]. Ainsi, ces erreurs potentielles de prévisions, dans le cadre du SCND, ont fait l'objet d'un nombre relativement important de recherches et ceci depuis de nombreuses années (voir par exemple [Knight, 1921]). Celles-ci peuvent être divisées en différents sous-groupes selon la nature des sujets étudiés et des approches de résolutions proposées. Ainsi, par la suite, sont distinguées les recherches relatives à la classification de l'incertitude, les modèles de résolution de type stochastique et les approches robustes ; une partie spécifique étant associée à chacun de ces groupes.

4.1. Prise en compte de l'incertitude

4.1.1. Incertitude : définitions et terminologies

Assez naturellement, de par l'importance croissante apportée à la prise en compte de l'incertitude, un nombre important de recherche a été mené relativement à sa définition et sa caractérisation. Ainsi, initialement a été proposé de distinguer les situations certaines, risquées et incertaines [Rosenhead et al., 1972]. Ces auteurs désignent par « certain », un environnement dans lequel l'intégralité des paramètres est connue précisément. A l'inverse, « risquée » se réfère à une situation dans laquelle une ou plusieurs donnée(s) peut(vent) prendre plusieurs valeurs; valeurs auxquelles peuvent être associées des probabilités reflétant leur chance de se produire. Par opposition, une situation « incertaine » correspond certes, selon ces mêmes auteurs, à une situation dans laquelle les données ne sont pas connues précisément, mais également où aucune estimation quant à l'occurrence de la réalisation d'un certain nombre de scénarios ne peut être déterminée. Cette distinction entre risque et incertitude traduit donc une différence dans le degré avec lequel la réalisation des différentes données d'un problème est connue.

Bien qu'initialement acceptée et utilisée par de nombreux chercheurs, cette différenciation entre risque et incertitude a été abandonnée. Ainsi, sont aujourd'hui généralement distingués les problèmes certains et ceux incertains, ces derniers correspondant à des situations dans lesquelles un doute existe sur la valeur réelle d'un ou plusieurs paramètres. Notons que dans ce contexte, le terme « incertitude » ne présente aucune connotation ni positive ni négative. A l'inverse, la notion de risque, découlant d'une situation incertaine, désigne le degré avec lequel un événement non désiré peut se produire [Stewart, 2005]. Cependant, bien que cette première classification distinguant les problèmes selon le degré de prévisibilité des données non connues précisément soit de moins en moins utilisé; la volonté de caractériser la nature de l'incertitude n'a pas été abandonnée pour autant. Ainsi, dans [Kibli et al., 2010] trois types sont distingués. Le premier correspond au cas d'une incertitude dite « usuelle »; c'est-à-dire d'une incertitude portant sur des données relativement classiques telles que la demande, les coûts de production ou encore les temps de transport. L'impact lié à cette difficulté à estimer ces paramètres, pouvant faire l'objet de distributions de probabilité, est considéré comme relativement faible. A l'inverse, la seconde catégorie, désignée sous le terme « hasard », est associée aux événements ayant une faible chance de se produire mais dont les conséquences, sur le système considéré sont très importantes. Ceci est par exemple le cas des catastrophes naturelles telles que des ouragans ou tremblements de terre pouvant conduire à la destruction d'entités au sein du système considéré. La dernière catégorie d'incertitude, qualifiée de « profonde » correspond, quant à elle, aux situations pour

lesquelles aucune probabilité d'occurrence ne peut être affectée à la réalisation de différents scénarios de valeurs pour un ou plusieurs paramètres [Lempert et al., 2006]

Dans le cadre de nos travaux, nous ne procédons pas à une discrimination selon le niveau de l'incertitude et nous contentons de séparer les problèmes certains de ceux incertains. Par contre, nous nous efforçons de bien différencier cette notion avec celle de variabilité d'un paramètre. Cette dernière ne correspond pas à une difficulté à l'estimer mais est liée à un aspect temporel et traduit l'évolution de sa valeur d'une période à l'autre. Ceci peut correspondre soit à un phénomène de saisonnalité ou à une instabilité non prévisible de celui-ci. Cette distinction entre incertitude et variabilité peut être plus facilement appréhendée à l'aide de la Figure 18.

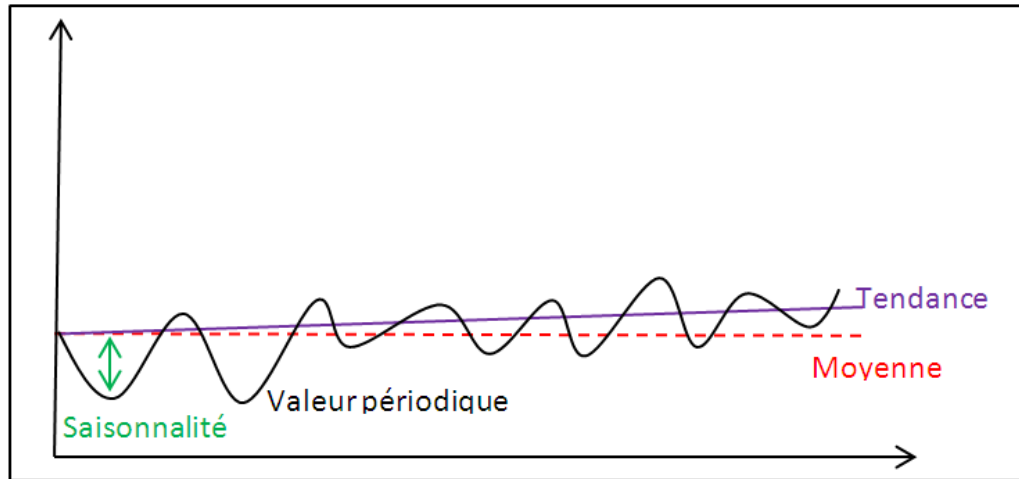


Figure 18 : Distinction incertitude et variabilité

Sur celle-ci est représentée la moyenne de la valeur, d'une variable quelconque, sur un certain horizon ainsi que la réalisation de celle-ci lors des différentes périodes. L'écart entre ces deux courbes traduit sa saisonnalité tandis que le profil de la seconde, représentant les valeurs périodiques, correspond à sa variabilité. Ce graphique comprend également un autre élément nommé « une courbe de tendance ». Celle-ci représente l'évolution de la valeur d'une variable au cours du temps mais sur des horizons plus conséquents. Elle a ainsi pour but de mettre en évidence une tendance haussière ou baissière.

Au sein de la littérature scientifique peut également être trouvé le terme de volatilité, et plus précisément celui de volatilité de la demande. Ce dernier traduit la durée dans le temps de l'attrait d'un bien ou d'un service auprès de ses clients, c'est-à-dire son cycle de vie. Il correspond ainsi au côté éphémère des attentes de consommateurs toujours en quête de nouveautés. Tout comme la variabilité, ce terme ne doit pas, lui non plus, être confondu avec la notion d'incertitude. Cette dernière concerne potentiellement des paramètres de natures diverses tels que les temps de transports, la demande ou encore le contexte politique. Ainsi, elle peut être issue d'un nombre important de causes différentes. La classification de ces sources d'incertitude a été, elle aussi, assez bien étudiée; des exemples de travaux pouvant être trouvés dans ([Christopher and Peck, 2004]; [Tang, 2006], [Kibbi et al., 2010]). Cette dernière référence propose une approche très intéressante, à savoir la séparation des sources d'incertitude en trois groupes comme illustré sur la Figure 19.

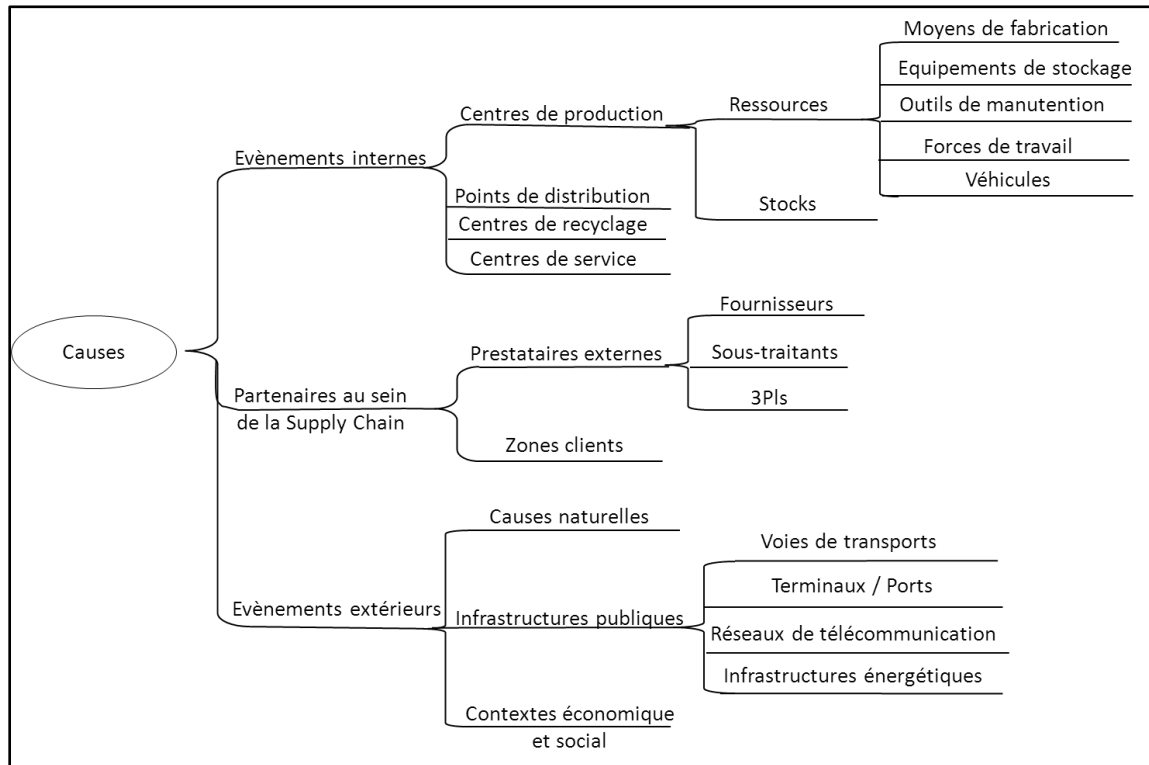


Figure 19 : Les différentes sources d'incertitudes [Kibbli et al., 2010]

Le premier de ces groupes, désigné sous les termes « sources endogènes », correspond à l'ensemble des événements pouvant intervenir au sein même du système considéré. Celui-ci comprend, par exemple, les risques liés à la production (pannes des machines, produits de mauvaises qualités,..) ou encore à la distribution. Le second groupe, quant à lui, est associé aux sources d'incertitudes provenant des partenaires au sein de la Supply Chain tels que les fournisseurs et clients. Dans ce contexte, les données non connues précisément sont la demande, la qualité des composants, ou encore le respect des plans de livraison de matières premières. A l'inverse de ces deux aspects, relatifs à des entités ou individus clairement identifiables, la troisième catégorie correspond à des sources d'incertitude environnementales comme les risques naturels, le fonctionnement des services publics ou encore la stabilité politique. Selon les auteurs, cette dernière catégorie est celle devant faire le plus l'objet d'investigations afin de s'en prémunir. En effet, ils considèrent que, bien qu'ayant très peu de probabilité de se produire, il convient de leur accorder une très grande importance de par leurs impacts potentiellement forts pouvant mettre en danger la viabilité d'un système et à fortiori d'une Supply Chain. Ceci fait notamment référence à des catastrophes naturelles tels que les séismes de 2012 au Japon ayant entraînés des destruction d'usines de fabricants électronique et ainsi désorganisé la production de bon nombre d'entreprises de matériels informatiques ainsi que du secteur automobile. Selon nous, cette approche, basée sur la matrice des risques proposée par Norman et Jansson ([Norman and Jansson, 2004]), n'est pas obligatoirement pertinente. Des événements plus communs, telle qu'une mauvaise estimation des coûts ou de la demande, sont tout aussi important, si ce n'est d'avantage. En effet, bien qu'entraînant moins d'impacts directs, leur réalisation répétée peut se traduire, de la même façon, par une forte menace sur la pérennité du système considéré. Il est donc indispensable d'en tenir compte au même titre que les autres, et ceci d'autant plus que leur probabilité d'occurrence est élevée.

Afin de représenter de telles sources d'incertitude et de tenir compte de leurs impacts dans le cadre du SCND, différentes approches ont été proposées et mises en œuvre au sein de la littérature scientifique, celles-ci faisant l'objet de la partie suivante.

4.1.2. Les différents modèles

La prise en compte de l'incertitude a fait l'objet d'un nombre relativement important de recherches ayant abouties à plusieurs grandes approches de modélisation. Un état de l'art relativement complet leur est d'ailleurs consacré dans [Sahinidis, 2004]. L'auteur identifie ainsi deux grandes approches afin de représenter l'incertitude à savoir :

- (i) la programmation stochastique consistant à séparer les variables d'un problème en plusieurs phases définissant leur ordre de réalisation. Cette séparation correspond, en général, à des contraintes temporelles; les décisions relatives à une phase devant être prises en amont de celles de la phase suivante; ces dernières pouvant être alors dépendantes de la réalisation de paramètres incertains. Dans ce contexte, le but est de minimiser (maximiser) les éléments de la fonction objectif associés aux variables de première phase ainsi que ceux espérés relatifs aux autres ;
- (ii) la programmation par logique floue consistante à ne pas chercher obligatoirement la meilleure solution d'un problème mais une dans un certain intervalle. La fonction objectif a alors la particularité d'être traitée comme une contrainte imposant de satisfaire une borne minimum et/ou maximum. Dans ce contexte, des degrés de libertés sont autorisés sur le respect de l'ensemble des contraintes.

L'approche stochastique est beaucoup utilisée afin de résoudre des problèmes dans un contexte incertain. Sa mise en œuvre est réalisée sous différentes formes donnant naissance à autant de méthodes spécifiques. L'une des plus connues consiste à considérer les variables de seconde phase et des suivantes comme des leviers permettant d'ajuster l'état du système issu de celles dites de première phase et, ceci, au regard de la réalisation des paramètres incertains. Cette méthode, désignée sous le terme « programmation with recourse » dans la littérature Anglo-Saxonne, est, elle-même, déclinée en plusieurs approches telles que les problèmes stochastiques en deux étapes ou en plus de deux étapes ainsi que la programmation stochastique robuste. Cette dernière présente la caractéristique d'introduire, en plus des autres éléments, une fonction pénalisant la non-réalisabilité des solutions vis-à-vis de certaines configurations des paramètres incertains. Ainsi, de par l'ajustement du coefficient affecté à cette dernière, le décideur a la possibilité d'imposer l'obtention d'une solution satisfaisant l'intégralité des contraintes sur tous les scénarios de réalisation des paramètres. A côté de ces méthodes, une autre approche liée à la programmation stochastique peut être trouvée à savoir la programmation stochastique probabiliste dont la particularité est d'imposer la satisfaction des contraintes du problème avec une certaine probabilité.

A titre illustratif, indiquons que dans le cadre de l'utilisation de la programmation stochastique afin de résoudre des problèmes du Supply Chain Network Design, la première phase est généralement constituée de décisions long terme, telles que l'ouverture ou la fermeture d'usines, tandis que les suivantes sont composées de décisions plus opérationnelles prises une fois les paramètres incertains réalisés; l'objectif étant alors de minimiser les différents coûts espérés et réels.

Ces deux approches, que sont la programmation stochastique et la programmation par logique floue, ont été utilisées à de nombreuses reprises dans la littérature. Parallèlement, ont également été définies différentes méthodes de résolution associées, telles que la simulation de

Monte Carlo ou la « Sample Average Approach (SAA) » ; ces dernières étant introduites au sein des deux parties suivantes dédiées à la réalisation d'un état de l'art sur les différents modèles traitant du problème de SCND dans un contexte incertain.

4.2. Modèles stochastiques

Tout comme pour la classification de l'incertitude, le nombre de recherches portant sur la définition de modèles stochastiques pour le problème de SCND dans un contexte incertain n'a cessé d'augmenter. Ainsi, par exemple, dans [Tsiakis et al., 2001] est proposé un MILP dans lequel les décisions concernent le nombre, la localisation et la capacité des entrepôts et centres de distribution, les liens entre entités (dont les usines) ainsi que les flux de produits et de matières. L'incertitude sur la demande est, quant à elle, introduite par le biais d'une approche multi-scénarios où est associée à chacun d'eux une probabilité de réalisation ; le MILP résultant étant résolu à l'aide du solveur Cplex. L'originalité de ce modèle est de définir des contraintes de ressources. Celles-ci correspondent au fait qu'au sein de chaque usine, des ressources doivent être partagées entre différents produits ; ceci aboutissant à une contrainte sur le nombre de ces derniers pouvant être fabriqués lors d'une même période. Malheureusement, ce nombre de ressources limite est une donnée d'entrée et ne fait pas l'objet d'un quelconque dimensionnement.

Ce même problème d'extension de capacités dans le cadre d'une demande incertaine est également adressé dans [Ahmed et al., 2003]. Plus précisément, les auteurs proposent un MILP pour la planification de l'affectation périodique de ressources afin de satisfaire la demande à coût minimum dans le cadre d'un système de production composé d'une ou plusieurs usines. Comme dans [Tsiakis et al., 2001], l'incertitude est représentée par l'intermédiaire de différents scénarios auxquels sont associés des probabilités liées à leur réalisation. Ce modèle ne constitue pas l'originalité de ces travaux ; celui-ci résidant dans la méthode de résolution proposée. En effet, exploitant la structure de leur MILP, les auteurs proposent une reformulation de celui-ci garantissant l'obtention d'une solution relaxée de bonne qualité. Celle-ci est ensuite réutilisée afin de construire une solution entière définissant une borne supérieure du problème initial. Cette dernière est alors, à son tour, utilisée afin de générer une borne inférieure violant certaines contraintes. La solution ainsi obtenue est ensuite modifiée afin de générer une solution réalisable de bonne qualité. Ce processus est inspiré d'une heuristique proposée par [Ahmed and Sahinidis, 2002] pour le problème de lot sizing. Il est ensuite intégré au sein d'un Branch&Bound, garantissant à son tour l'obtention de solutions de bonnes qualités. Bien qu'intéressante, cette approche est limitée par les restrictions imposées sur le modèle initial. Ainsi par exemple, une seule famille de produits est considérée alors même que différents types de machines sont introduits ; celles-ci différant uniquement par leurs coûts ainsi que capacités mais pas vis-à-vis de leur capacité.

Un tel problème est également considéré dans [Guillén et al., 2005] pour une Supply Chain constituée d'usines, de points de stockage ainsi que de distribution. Plus précisément, un MILP stochastique en deux étapes est proposé ; les décisions de premières phases correspondantes à la localisation ainsi qu'au dimensionnement capacitaire des entités et celles de seconde phase à la planification de la production ainsi qu'à la coordination des différents flux. Une des particularités de leurs travaux est de considérer une fonction multi-objectifs constituée du profit ainsi que de la satisfaction de la demande tout en intégrant la notion de risque financier. Ceci est, notamment, réalisé par la représentation des solutions, obtenues par l'utilisation du solveur Cplex, sous la forme de Front de Pareto permettant de confronter les résultats vis-à-vis de ces différents critères. De plus, à travers leurs exemples numériques, ils illustrent l'intérêt de mettre en œuvre une approche stochastique plutôt que d'adopter une vision purement déterministe afin de

résoudre des problèmes soumis à une quelconque forme d'incertitude. Une autre approche multi-objectifs peut également être trouvée dans [Azaron et al., 2008]. Elle concerne le niveau de la demande mais également l'approvisionnement ainsi que les coûts relatifs à la production, au transport et à l'extension des capacités. Ainsi, un modèle stochastique en deux phases consistant à minimiser les différents coûts (actuels et futurs) ainsi que leurs variances est développé. De plus, est prise en compte la notion de risque financier par l'introduction d'une pénalité traduisant la probabilité que le budget cible soit dépassé. Afin de résoudre ce modèle, une approche de programmation par objectifs est proposée. Ces différents travaux ont ensuite été repris dans [Azaron et al., 2009] où d'autres méthodes de résolutions ont été mises en œuvre.

Plus récemment, dans [Georgiadis et al., 2011], a été proposé un autre modèle stochastique en deux étapes pour le SCND et, ceci, dans le cadre d'une Supply Chain multi-produits à quatre niveaux. Dans celui-ci, les variables de première phase concernent la localisation des entrepôts et centre de distribution ainsi que leurs capacités tandis que celles de seconde phase sont relatives aux flux de matières au sein de la Supply Chain. Notons qu'ici seule l'incertitude relative à la demande est considérée et, ceci, par l'intermédiaire d'une approche multi-scénarios auxquels sont associées différentes probabilités de réalisation. Dans ce contexte, l'objectif consiste à minimiser les coûts fixes d'ouvertures des entités (usines, entrepôts,...) et ceux espérés relatifs à leur utilisation ainsi qu'à la circulation des produits. Une des particularités, du modèle ainsi obtenu, est la prise en compte de stocks de sécurité en différents points du réseau. Cependant, la valeur de ces derniers est une donnée d'entrée et ne fait pas l'objet d'un quelconque dimensionnement. De plus, l'entière satisfaction de la demande est imposée alors même que ceci peut ne pas être souhaitable dans une logique de maximisation du profit. Celui-ci est mis en œuvre dans le cas d'une Supply Chain composé de trois usines réparties dans trois pays Européens fabricant un portefeuille produit composé de 14 éléments ; la résolution étant réalisée à l'aide du solveur Cplex. Ces travaux ont été étendus dans [Longinidis and Georgiadis, 2011] où sont également intégrés des paramètres financiers au sein de la fonction objectif.

Tout comme dans [Azaron et al., 2008], et par opposition à un grand nombre d'autres articles, au sein de [Baghalian et al., 2013], plus d'un type d'incertitude inhérent au fonctionnement d'une Supply Chain sont considérés simultanément, à savoir ceux liés à la demande et à l'approvisionnement. La particularité de l'approche développée est d'aborder ces éléments par l'intermédiaire d'un modèle MILP non linéaire basé sur le concept de « chemin » ; un chemin correspondant à une façon de satisfaire la demande relative à un produit depuis le fournisseur jusqu'au distributeur. L'objectif consiste alors à trouver la configuration, en termes de localisations d'entités, permettant de maximiser le profit espéré. Dans ce contexte, l'incertitude relative à la demande est représentée à l'aide d'une distribution de probabilité associée tandis que les potentiels risques liés à l'approvisionnement sont introduits par l'intermédiaire de différents scénarios. Ce modèle, linéarisé à l'aide d'une méthode de linéarisation par morceaux et résolu à l'aide du solveur commercial LINGO, est appliqué sur le cas réel d'une Supply Chain de production et de transformation de riz.

Une des difficultés majeures inhérentes à toute approche multi-scénarios réside dans la génération de ces derniers. En effet, ceux-ci ne doivent pas être trop nombreux, sous peine d'aboutir à des instances trop longues à résoudre, mais également en quantité suffisante afin de refléter réellement l'incertitude de l'environnement considéré. Dans ce contexte, différentes méthodes ont été développées afin de définir le nombre adéquat à générer. Ainsi, récemment une heuristique permettant de résoudre des problèmes stochastiques en deux phases a été proposée [Karuppiyah et al., 2010]. Celle-ci consiste à générer, à partir d'un vaste ensemble prédéterminé, un sous-ensemble de scénarios le plus représentatif possible ; ceci résultant en l'obtention d'un MILP devant être résolu sur un espace de recherche de plus petite taille. D'autres méthodes ont été utilisées dont notamment la simulation de Monte Carlo. Ceci est à rapprocher de l'essor que

connaissent les différentes approches par simulation dans de nombreux domaines tels que la santé, la planification de la production et plus largement dans le contexte de la recherche opérationnelle ; des états de l'art sur le sujet pouvant être trouvés dans ([Smith, 2003]; [Terzi and Cavaleri, 2004]; [Chan and Chan, 2005]; [Jahangirian et al., 2010]). Durant ces dernières années, le SCM et notamment le SCND, sont les domaines dans lesquels elle a été le plus employée, notamment parce qu'elle semble être la plus adéquate afin de procéder au dimensionnement de chaînes logistiques tout en intégrant les paramètres liés à un environnement incertain [Van der Zee et Van der Vost, 2005]. Dans ce contexte, la simulation de Monte Carlo, introduite dans [Metropolis and Ulam, 1949], consiste, pour une solution donnée, à approcher l'espérance d'une variable aléatoire, telle qu'une fonction objectif, par une moyenne calculée sur un ensemble de scénarios générés aléatoirement suivant une certaine loi de probabilité. Plus précisément, chaque scénario définissant une instance d'un modèle déterministe, leur résolution permet d'obtenir un ensemble de valeurs pour les variables aléatoires à partir desquelles sont calculées des moyennes permettant d'approcher leurs espérances et, ceci, pour une solution donnée. Le nombre d'itérations à effectuer, c'est-à-dire de scénarios à considérer, correspond alors au minimum à réaliser afin d'obtenir des intervalles de confiance suffisamment petit pour les estimateurs des différentes espérances ; ceux-ci étant évalués, pour un niveau de confiance désiré, par le recours à la loi de Student. Remarquons que cette méthode a pour but d'évaluer la qualité d'une solution au regard de l'incertitude relative à un ensemble de paramètres et non d'en proposer de nouvelles. Celle-ci a, par exemple, été utilisée dans [Riddlehoover, 2004] pour un problème de localisation d'une nouvelle entité (entrepôt ou point de distribution) au sein d'un réseau existant tout en tenant compte des potentiels risques financiers. Ainsi, les emplacements candidats sont évalués à travers la mise en œuvre d'un processus de simulation de Monte Carlo permettant de tenir compte de l'incertitude relative à ces éléments.

Suite à l'apparition de la méthode de simulation de Monte Carlo, de nombreuses études relatives à sa convergence ont été réalisées (voir par exemple [Mak et al., 1999]) donnant naissance à de nouvelles approches telles que celles par échantillonnage et, ceci, dans le but de pallier le problème de génération de scénarios. Ceci est par exemple le cas de la Sample Average Approach (SAA) [Kleywegt et al., 2001]. Celle-ci a pour objectif, à l'inverse de la simulation de Monte Carlo, de générer directement une solution pour un problème stochastique ainsi qu'un estimateur associé. Elle consiste, non pas à considérer un unique ensemble de scénarios de réalisations des paramètres incertains, mais plusieurs échantillons. Ainsi, chacun de ces derniers fait l'objet d'une résolution aboutissant à un ensemble de solutions ainsi que de valeurs pour la fonction objectif ; ces dernières correspondantes à autant d'approximations de son espérance. A partir de celles-ci est alors calculée une moyenne, définissant une borne inférieure de la valeur optimale, ainsi qu'une variance associée. Une fois cette étape achevée, a lieu un processus de génération d'une borne supérieure. Celui-ci consiste à choisir une solution y , parmi l'ensemble de celles générées précédemment, puis à évaluer la valeur moyenne de la fonction objectif, pour y , sur un nouvel ensemble d'échantillons de scénarios de réalisation des paramètres incertains. Suite à cette étape sont alors calculés un estimateur de l'écart entre cette valeur moyenne et la solution optimale ainsi qu'un autre associé à sa variance. Dans le cas où les résultats sont satisfaisants, la solution y est choisie sinon le processus est réitéré avec un nombre et/ou une taille d'échantillons plus important(s). Cette dernière peut donc s'avérer importante et rendre ainsi le processus de résolution des différents sous-problèmes obtenus relativement difficile. Afin de pallier cette difficulté, cette méthode a été couplée, dans certains travaux, avec d'autres plus classiques dont l'algorithme de décomposition de Benders permettant d'accélérer la résolution de problèmes linéaires.

Un exemple de couplage de la méthode SAA et de l'algorithme de décomposition de Benders peut être trouvé dans [Santoso et al., 2005] où les auteurs proposent un modèle stochastique en deux phases pour le SCND. Les décisions long termes, de première phase,

concernent la construction des entités de production et l'achat de machines tandis que celles de types opérationnelles, de seconde phase, consistent à piloter le flux à travers la Supply Chain. Dans ce contexte, l'incertitude correspond aux coûts de transport, au niveau de la demande ainsi qu'aux capacités réelles. L'objectif, quant à lui, consiste à minimiser les investissements mais également les différents coûts de type opérationnels. Le modèle ainsi obtenu est résolu à l'aide de la Sample Average Approach au cours de laquelle les différentes résolutions des problèmes approchés sont réalisées par la mise en œuvre d'un algorithme de décomposition de type Benders. Cette méthode a également été mise en œuvre dans ([Bihandi and Yusuff, 2011]) où un modèle stochastique mono-période et multi-produits pour le problème de SCND est proposé. L'incertitude réside sur les valeurs des coûts de production, le niveau de la demande ainsi que les capacités des usines.

Dans [Vila et al., 2009] un autre modèle stochastique en deux phases résolu à l'aide de la méthode SAA peut être trouvé. Celui-ci est dévolu à la résolution d'un problème de SNCD dans le cadre de l'industrie forestière. Une de ses particularités réside dans le choix des variables de première phase. En effet, outre l'ouverture saisonnière des entités, le choix du type de capacités à installer au sein de chaque unité de production et de zone de stockage à affecter à chaque entrepôt, sont également considérées des décisions habituellement qualifiées d'opérationnelles. Ces dernières concernent les volumes de chaque produit transitant entre les différentes entités autres que celles dévolues au stockage, les quantités fabriquées au sein de chaque unité de production et de distribution ainsi que les différents niveaux de stocks de matières premières ; le tout pour chaque saison de l'horizon considéré. Dans ce contexte, les variables de seconde phase correspondent aux volumes saisonniers de chaque produit transitant entre les unités de production et les zones de stockages, au niveau des stocks de produits finis ainsi qu'à l'affectation de ces derniers aux différents marchés. Celles-ci dépendent de la réalisation de scénarios de demandes pour chaque zone de vente. Ce découpage des variables est motivé, selon les auteurs, par le fait que la détermination à l'avance du niveau de matières premières disponibles facilite le pilotage de la production tandis que la détermination anticipée des quantités à produire clarifie la mission de chaque unité de fabrication. De plus, cela présente l'avantage de réduire considérablement la taille des problèmes adressés, ces variables ne dépendant alors pas des scénarios de réalisation des paramètres incertains. Malgré ces avantages, nous pouvons noter que dans bien des contextes, une telle hypothèse n'est pas envisageable et conduirait à l'obtention de solutions de mauvaises qualités.

L'approche SAA a également été utilisée dans [Schütz et al., 2009], où elle est, là encore, couplée avec une méthode de décomposition, afin de résoudre un problème de SCND dans le cadre d'une demande incertaine. Ce problème a été modélisé sous la forme d'un modèle stochastique en deux phases; la première concernant l'installation de procédés de fabrication au sein des entités et la seconde la gestion opérationnelle de la production. L'objectif consiste alors à minimiser les coûts inhérents à cette dernière phase ainsi que les investissements tandis que des pénalités sont introduites en cas de non satisfaction de la demande; demande dont le caractère incertain a été adressé par une approche multi-scénarios. Une des particularités de ces travaux est la comparaison de l'impact du niveau d'agrégation des données de seconde phase sur les décisions stratégiques. Ainsi, ils montrent à travers un exemple portant sur une Supply Chain agroalimentaire Norvégienne, que le coût relatif aux décisions de première phase est moins élevé dans le cas d'une modélisation fine des paramètres opérationnels.

A l'inverse de ces différents modèles ayant tendance à séparer les horizons de planification, une approche intégrée pour le problème de SCND est proposée dans [Manzani et al., 2008]. Celle-ci consiste à résoudre successivement les problèmes de planification stratégique, tactique et opérationnelle. Pour ce faire deux modèles sont proposés. Le premier, monopériode, a pour objectif de dimensionner le réseau tandis que le second a trait à la planification tactique et

opérationnelle. Ces derniers sont intégrés dans un processus itératif et interactif conduisant à l'obtention de différentes solutions. Les auteurs préconisent alors de les évaluer à travers la mise en œuvre d'un processus de simulation permettant, notamment, de représenter l'incertitude sur la demande.

Les différentes approches évoquées jusqu'à maintenant partagent tout un point commun à savoir le fait qu'elles peuvent conduire à l'obtention de solutions très mauvaises pour certains scénarios. Or, dans certaines situations, il se peut qu'un tel résultat soit inenvisageable, notamment dans le cadre d'une incertitude de type financière ou encore relative à des paramètres vitaux. Ainsi, d'autres approches ont été développées dans le but d'obtenir des solutions robustes, celles-ci faisant l'objet de la partie suivante.

4.3. Modèles robustes

Dans le cadre du SCND, la notion de robustesse se réfère à la capacité d'une Supply Chain à maintenir ses activités quelle que soit la réalisation des paramètres incertains parmi un vaste ensemble de scénarios envisageables [Snyder and Daskin, 2006]. Assez logiquement, celle-ci a été mise en œuvre initialement dans le cadre des problèmes les plus simples du SCND, à savoir ceux d'implantation d'entités sans contraintes de capacités (UFLP). Ainsi, par exemple, dans [Gutierrez et al., 1996] ce problème est représenté sous la forme d'un MILP monopériode consistant à déterminer les entités à ouvrir afin d'obtenir une solution robuste à différents scénarios de demandes ainsi que de coûts. Par solution robuste, les auteurs entendent ici une solution qui, quel que soit le scénario de réalisation des paramètres incertains, se situe dans un certain intervalle autour de l'optimale. Ceci correspond à une notion de regret consistant à garantir que le dimensionnement retenu aboutira à une solution proche de la meilleure pour toutes les réalisations des paramètres incertains. Un des atouts de ce modèle est de proposer une méthode de résolution exacte et une autre approchée dérivées toutes les deux de l'algorithme de décomposition de Benders. Comme illustré par une application numérique, celles-ci s'avèrent de bonne qualité, que cela soit en termes de temps de calcul que de solutions obtenues. Un problème similaire est également traité dans [Yu et Li, 2000], à ceci près qu'il n'intègre pas les décisions de localisations. Celui-ci concerne plus précisément la gestion du flux, au sein d'un réseau logistique, dans le cadre de paramètres (coûts de transport, de production,...) incertains. Assez classiquement, ce dernier aspect est introduit par l'intermédiaire d'un ensemble de scénarios auxquels sont associées différentes probabilités de réalisation. Ainsi, les décisions sont constituées de l'établissement des liens entre les entités et de la définition des quantités à produire et à expédier, au sein de chacune d'elles, tandis que la fonction objectif consiste à minimiser les différents coûts mais également la variance de ces derniers sur l'ensemble des scénarios. De plus, sont ajoutées des pénalités pour le non-respect de certaines contraintes ; ce dernier point correspondant à l'approche robuste. L'apport de cet article réside dans la proposition d'un nouveau modèle. En effet, reprenant les travaux de ([Mulvey et al., 1995a] ; [Mulvey et al., 1995b]) pour ce problème, les auteurs en proposent un autre permettant de diminuer le nombre de variables considérées et ainsi d'accélérer les temps de résolution ; ceci étant illustré à travers deux exemples numériques. Outre cet aspect, cet article a également pour intérêt de présenter clairement et simplement le problème de gestion d'un réseau logistique sous contrainte d'incertitude.

Bien entendu, l'optimisation robuste a également été utilisée afin de résoudre d'autres problèmes relatifs au SCND. Par exemple, celle-ci a été mise en œuvre dans [Bok et al., 2008] pour l'extension de capacités d'un système de production dans le cadre d'une demande incertaine ; ce dernier aspect étant représenté par l'intermédiaire d'une approche multi-scénarios auxquels sont associées différentes probabilités de réalisation. Le modèle ainsi proposé prend la

forme d'un MILP stochastique non linéaire en deux phases, les décisions de premières phases concernant l'extension périodique des capacités des différentes usines et celles de seconde phase des aspects opérationnels, à savoir, la production, les ventes ainsi que l'achat de matières. La fonction objectif consiste alors à maximiser le profit espéré tout en pénalisant la variance de celui-ci ainsi que la non satisfaction de certaines contraintes. Ces deux derniers aspects correspondent au souhait d'obtenir des solutions robustes; la valeur des pénalités pouvant être ajustée en fonction de la volonté de privilégier ou non l'un de ces paramètres. Afin de résoudre ce problème, une approche par programmation stochastique est utilisée. Celle-ci consiste à évaluer successivement le problème maître et le sous-problème jusqu'à satisfaction d'un certain critère de convergence ; la résolution étant réalisée par le recours à un solveur adapté aux problèmes non linéaires (CONOPT, [Drud, 1985]). Plus récemment, une approche robuste pour le problème de SCND sous contraintes d'incertitudes, dans le cadre d'une Supply Chain intégrant la partie récupération et traitement des produits, a été proposé [Pishvaei et al., 2011]. Ainsi, dans un premier temps un MILP déterministe monopériode et monoproduit est défini. Celui-ci consiste à déterminer le nombre de points de collecte, de centres de reconfiguration et de distribution à ouvrir ainsi que leurs emplacements parmi un ensemble de localisations possibles; l'objectif étant de minimiser les coûts fixes ainsi que de transports. Ce modèle est ensuite étendu afin de tenir compte de plusieurs scénarios de réalisation des paramètres incertains, à savoir la demande, les coûts de transport ainsi que la quantité de produits à retraiter. Dans ce cas, l'objectif consiste alors à trouver une solution robuste, c'est-à-dire satisfaisant, à moindre coût, l'intégralité des scénarios extrêmes associés. Par une comparaison entre ce modèle et la version déterministe, les deux étant résolus à l'aide du solveur Ilog Cplex, sur un ensemble de scénarios de demande, de coûts ainsi que de nombre de produits à traiter, les auteurs démontrent l'intérêt de développer une telle approche notamment afin de garantir la réalisabilité des solutions dans le cadre d'une incertitude importante. Cependant, notons, qu'aucune conclusion ne peut être tirée à partir des résultats obtenus, le modèle étant limité par son aspect monopériode et monoproduit.

4.4. Conclusion

Comme illustré au cours de ce chapitre, la littérature relative au SCND dans un contexte incertain est relativement abondante. Cependant, aucune des références introduites ne peut être utilisée afin de résoudre le problème adressé dans le cadre des travaux de thèse faisant l'objet de ce manuscrit. En effet, un certain nombre d'entre elles n'aborde pas une ou plusieurs des contraintes considérée(s) dans le cadre de nos travaux et présentent des simplifications importantes. Ces éléments correspondent par exemple à l'absence de dimensionnement des ressources ([Tsiakis et al., 2001], [Azaron et al., 2008], [Georgiadis et al., 2011]...), à la prise en compte d'une unique famille de produits ([Pishvaei et al., 2011]) ou encore à l'obligation de satisfaire la demande ([Georgiadis et al., 2011], [Longinidis and Georgiadis, 2011]...) alors même que ce dernier point peut s'avérer sous-optimal.

Cependant, ces différents éléments ne constituent pas la restriction la plus importante de ces articles. En effet, ceux-ci n'adressent pas un élément majeur de nos travaux à savoir le dimensionnement de la flexibilité qui représente un des moyens les plus pertinents afin de construire des Supply Chain capables de s'adapter aux différentes réalisations des paramètres incertains. Ce rôle est d'ailleurs mis en exergue par la définition de la robustesse donnée dans [Wong and Rosenhead, 2000] où celle-ci est définie comme une mesure de la flexibilité d'un système lui permettant de pouvoir réagir dans le futur et, ceci, quel que soit le scénario de réalisation des paramètres incertains. L'importance que revêt la flexibilité a d'ailleurs été prise en compte au sein de la communauté scientifique comme en atteste les nombreux articles relatifs au SCND adressant cette notion. Avant de s'intéresser à cet aspect au sein de la partie suivante, il convient de mentionner des états de l'art intéressants sur l'optimisation robuste [Kouvelis and

Yu, 1997], la programmation stochastique ([Birge and Louveau, 1997]; [Shapiro, 2007]), la localisation d'entités dans un contexte incertain (Snyder, 2006), sur les modèles utilisés dans des contextes incertains([Matos , 2007]) et le SCND sous contrainte d'incertitude en général [Kibli et al., 2010].

5. SCND et flexibilité

Les articles référencés dans la partie précédente ont tous pour objectif de construire des systèmes, en l'occurrence des Supply Chain, adaptés aux différentes réalisations des paramètres incertains. Cependant, ils ne tiennent pas compte d'un élément important à savoir le dimensionnement de la flexibilité. En effet, les différentes sources d'incertitudes inhérentes à toute activité, telles que le niveau de la demande ou encore l'acceptation des produits, ont été augmentées de par les changements importants qui se sont produits dans de nombreux secteurs lors des années quatre-vingts [Bertrand, 2003]. Ceux-ci se sont, par exemple, traduits par une hausse de la concurrence ainsi qu'une modification du comportement des clients. Ces derniers se sont, par exemple, habitués à de nouvelles pratiques de consommation telles que le renouvellement fréquent des produits ou encore la personnalisation de ces derniers conduisant Gong [Gong, 2008] à constater que « l'efficacité de la production de masse doit être disponible pour une production différenciée ». Ainsi, afin d'obtenir des systèmes de production et des Supply Chain robustes, capables de s'adapter à ce nouvel environnement, les entreprises ont dû considérer la notion de flexibilité. Adam et Swamidass [Adam et Swamidass, 1989] soulignent d'ailleurs l'importance que revêt le dimensionnement de cette dernière dans le cadre de tout processus de décisions stratégique, au même titre que les coûts, la qualité et les technologies utilisées. Cette augmentation, de l'intérêt porté sur la flexibilité, s'est logiquement accompagnée de l'émergence de nombreuses études relatives à son sujet. Ainsi peuvent être différenciés, respectivement, les travaux portant sur sa définition, son évaluation et son dimensionnement.

5.1. Caractérisation et utilisation de la flexibilité

5.1.1. Définition et classification de la flexibilité

La notion de flexibilité a fait l'objet d'un nombre assez important de définitions différentes ; une relativement commune étant celle proposée par [Upton, 1994] à savoir « la capacité à changer ou réagir avec peu de pénalités en termes de temps, d'efforts, de coûts et de performances » à des variations de l'environnement. D'autres chercheurs indiquent également qu'il s'agit d'une propriété inhérente à un système ([Mandelbaum and Buzacott, 1990]; [Mahapatra and Melnyk, 2000]) lui permettant de répondre à des variations non prévues de l'environnement [Stevenson and Spring, 2007]. Les premières études réalisées sur le sujet l'ont été dans le cadre des systèmes de production, un état de l'art pouvant être trouvé dans [Beach et al., 2000]. Cet article a plus précisément pour objectif de recenser les différentes recherches réalisées quant à la définition ainsi que la classification de la flexibilité. Celui-ci illustre ainsi le fait qu'un nombre important d'études différentes ont été menées ; ces dernières conduisant à une profusion de définitions et de classification différentes voir même antagonistes. A ce sujet, [Sethi and Sethi, 1990] identifient, au sein de la littérature scientifique, plus de 30 termes relatifs aux différents leviers de flexibilités, certains se référant aux mêmes tandis que [Swamidass et al., 1987] soulignent que certains d'entre eux en regroupent, en réalité, plusieurs. [Sethi and Sethi, 1990] propose, selon nous, une classification relativement intéressante de la flexibilité. En effet, les auteurs s'efforcent de différencier les formes qu'elle peut prendre en fonction de leur niveau dans

le système, mais surtout de mettre en évidence leurs liens. Ainsi, ils en recensent onze différentes à savoir :

- (i) la flexibilité machine définie comme le nombre d'opérations différentes qu'une machine peut réaliser sans demander trop d'efforts pour passer de l'une à l'autre ;
- (ii) la flexibilité caractérisant la facilité à manipuler différents types de matériaux («material handling flexibility ») ;
- (iii) le nombre de gammes opératoires différentes pouvant être utilisées afin de réaliser un même composant (« operation flexibility ») ;
- (iv) la flexibilité liée au processus de fabrication caractérisant le nombre de produits différents pouvant être fabriqués au sein du système ;
- (v) la flexibilité « produit » correspondante à la capacité à substituer les composants d'un bien par d'autres ainsi qu'à en introduire de nouveaux ;
- (vi) la « routing flexibility » définie comme le nombre de flux alternatifs pouvant être utilisés afin de fabriquer un même produit ;
- (vii) la flexibilité volume associée à la capacité d'un système à adapter rentablement le volume de sa production ;
- (viii) la capacité à agrandir et faire évoluer l'appareil de production (« expansion flexibility ») ;
- (ix) la capacité d'un système de production à fonctionner sans intervention de maintenance pendant un certain temps (« program flexibility ») ;
- (x) le nombre de composants différents pouvant être fabriqués sans nécessiter des investissements conséquents (« production flexibility ») ;
- (xi) la capacité à identifier les nouvelles attentes du marché et à agir en conséquence (« Market flexibility »).

Notons que parmi ces différentes formes de flexibilité, les trois premières sont inhérentes à chaque moyen de production et indispensables à l'obtention des suivantes associées aux usines dans leur ensemble.

Une approche similaire en termes de hiérarchisation des formes de flexibilité peut être trouvée dans [Khoste and Malhotra, 1999] même si la nature de ces dernières diffère quelque peu. Ainsi, les auteurs identifient les flexibilités machine, travail et approvisionnement comme les bases de toute forme de flexibilité. En effet, ces éléments sont, selon eux, indispensables à l'obtention d'une certaine souplesse en termes de processus de fabrication (nombre de configurations de flux différentes permettant de réaliser un même produit). Remarquons, qu'à l'inverse, l'objectif associé à cette souplesse définit les valeurs que doivent prendre ces trois formes de flexibilité. Une fois celui-ci atteint, le système est alors supposé avoir une certaine flexibilité volume ainsi que mix flexibilité. Ces derniers éléments constituent, selon eux, le degré le plus haut de flexibilité au sein d'un système de production, au même titre que la capacité à modifier ce dernier par l'ajout de ressources ou leurs modifications. Ainsi, les auteurs les considèrent comme les leviers permettant de mesurer la capacité du système à moduler le flux de production, que cela soit en termes de volume que de types de produits finis. A ceux-ci, comme à toutes les formes de flexibilité, certains chercheurs attribuent, notamment, deux caractéristiques principales, à savoir le temps nécessaire à leur mise en œuvre ainsi que l'ampleur de l'adaptation offerte ([Slack, 1983]; [Gerwin, 1987]).

De par l'adaptation du mode de fonctionnement des entreprises par une intégration de leurs différents partenaires, la notion de flexibilité a logiquement été considérée dans le cadre des Supply Chain [Lummus et al., 2003]. En effet, il est rapidement apparu que disposer uniquement d'un système de production flexible n'était plus suffisant dans le cadre d'un marché globalisé [Kumar et al., 2006] et que cette notion devait être étendue aux autres partenaires. Cette mutation a donné naissance au concept de « Supply Chain Flexibility » (SCF) pouvant être définie comme « la capacité d'une Supply Chain et de ses partenaires à être réceptif à tout changement mineur ou majeur de leur environnement économique, à pouvoir estimer la situation réelle et à y répondre simplement par le biais de mesures correctrices, en peu de temps et à faible coût, tout en maintenant un bon niveau de performances » [More and Babu, 2009a]. Cette approche, dans le cadre d'une Supply Chain justifie les différentes classifications présentées précédemment. En effet, dans un tel contexte, sont principalement considérées la flexibilité volume, la facilité à réaliser de nouveaux produits ainsi que la flexibilité issue du mix fabriqué (traduction littérale de « mix flexibility », appelée aussi mix flexibilité) [Bertrand, 2003]. Or, cet auteur souligne également, que ces deux dernières formes ne peuvent être obtenues seulement si le réseau considéré dispose de suffisamment de flexibilité machine ainsi que de flexibilité du travail qui correspondent aux deux formes de flexibilité les plus pertinentes au sein d'une usine. Notons que par « flexibilité issue du mix fabriqué » nous entendons la capacité d'un système à proposer le produit désiré par les clients au bon moment. Cet aspect, correspondant à la « processus flexibilité » définie dans [Sethi and Sethi, 1990] prend, ainsi, la forme d'une affectation à différentes entités (usines, entrepôts...), de la production d'un même produit ou d'une même tâche ; ceci permettant d'effectuer des transferts de charge afin d'allouer les ressources de fabrication aux produits ou opérations dont la demande est en hausse au dépend de ceux en ayant une en baisse [Chandra et al., 2005].

Ces différentes formes de flexibilité constituent autant de leviers à disposition d'une entreprise ou d'une Supply Chain afin d'améliorer ses performances économiques. Cependant, afin de profiter de tels avantages celles-ci doit faire l'objet d'un pilotage approprié, pilotage ayant fait l'objet d'un certain nombre d'études au sein de différents articles.

5.1.2. Stratégies d'utilisation de la flexibilité

Parallèlement aux études relatives à la classification des différentes formes de flexibilité, certains auteurs se sont intéressés à leur utilisation. Ainsi, par exemple, dans [Gerwin, 1993], quatre stratégies différentes, mais compatibles entre elles et recourant toutes à différentes formes de flexibilité, sont proposées. La première consiste à prendre des mesures afin de réduire l'incertitude telles que l'établissement de contrats privilégiés avec les différents fournisseurs et clients ou encore la maintenance préventive des moyens de production. La seconde, nommée « banking », a quant à elle pour objectif de pallier les variations prédictibles (dans une certaine mesure). Elle peut, par exemple, prendre la forme du dimensionnement de stocks de sécurité. En ce qui concerne la troisième, celle-ci a attrait aux événements non-récurrents et difficilement prévisibles, tels que des ruptures d'approvisionnements provoqués par des phénomènes climatiques, et consiste à utiliser des leviers de flexibilité qualifiés de défensifs comme la flexibilité volume. A l'inverse de ces deux dernières consistant à recourir à des leviers de flexibilité afin de pallier des événements, la quatrième stratégie préconise de les utiliser d'une manière pro-active dans le but d'obtenir un avantage concurrentiel. Ceci peut, par exemple, consister à raccourcir le cycle de vie de ses produits afin de devancer les attentes des consommateurs ou d'en créer de nouvelles.

Ces différentes classifications et stratégies mentionnées dans [Gerwin, 1993] ne sont pas les seules à avoir été proposées ; d'autres étant recensées dans [Beach et al., 2000]. Ces auteurs

s'efforcent d'ailleurs de les unifier et de les hiérarchiser au sein du schéma reproduit sur la Figure 20. Celle-ci met en évidence les différents niveaux de prise de décisions dans le cadre d'un système de production. Ainsi, par exemple, la stratégie commerciale se définit en une série d'objectifs stratégiques définissant eux-mêmes une politique de production. Ceci se traduit par une utilisation proactive de la flexibilité dans le but de diminuer l'incertitude relative à l'environnement ainsi que ses impacts. De plus, cette politique définit également la flexibilité requise au niveau même des moyens de fabrication afin de pouvoir réagir en cas d'événements extérieurs non conformes aux prévisions. Remarquons que ce découpage suppose une évaluation de la performance des activités mises en œuvre afin de pouvoir adapter les différentes stratégies envisagées. Ce schéma met ainsi clairement en évidence le lien entre incertitude et flexibilité ainsi que la dépendance entre cette dernière et l'horizon de temps considéré et, ceci, à travers les différentes stratégies d'utilisation mises en œuvre.

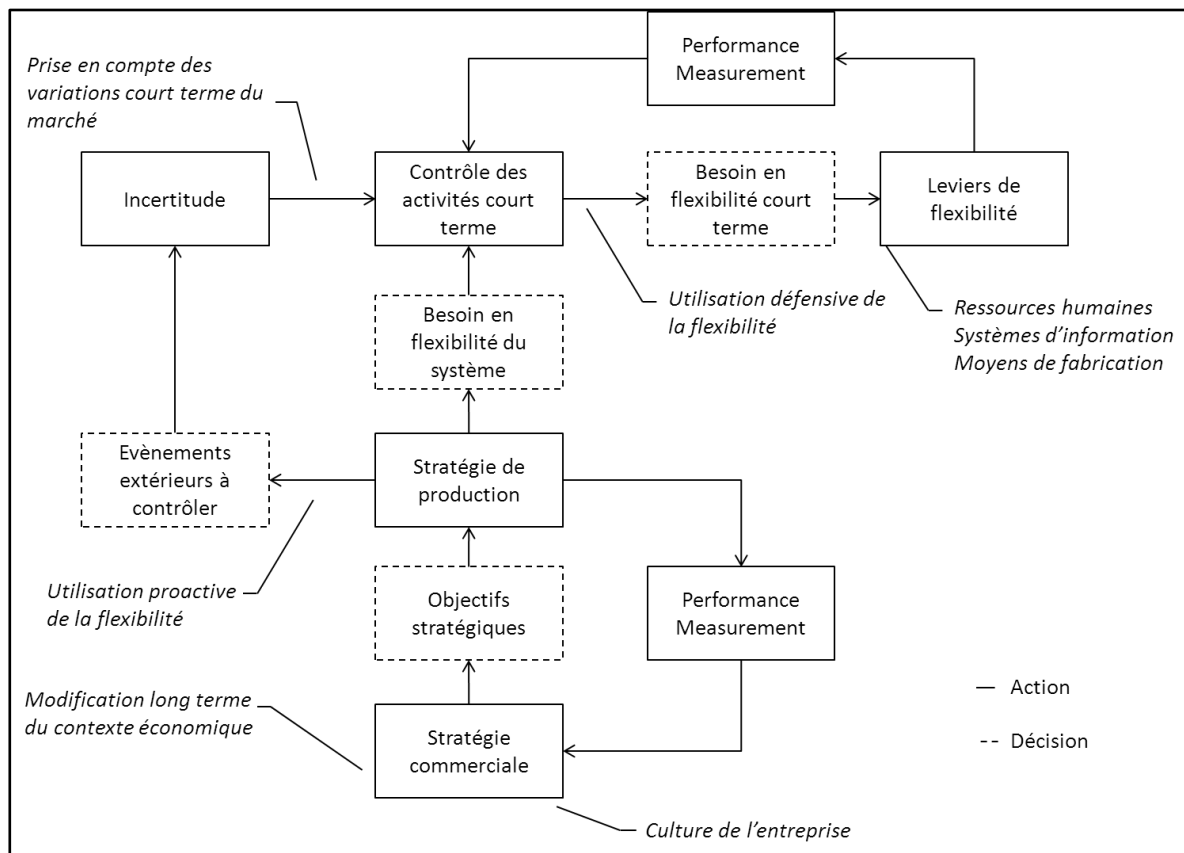


Figure 20 : Types de flexibilité et stratégies associées [Beach, 2000]

Maintenant que la notion de flexibilité a été présentée, il convient de préciser que celle-ci est bien souvent confondue avec d'autres notions. Ainsi, afin d'éviter toutes confusions, il convient de s'efforcer de distinguer et définir le plus clairement possible ces différents termes.

5.1.3. Terminologie liée à la notion de flexibilité

La notion de flexibilité ayant été clairement définie au sein des parties précédentes, il convient d'introduire différents termes et notions avec lesquels elle est bien souvent confondue, que cela soit dans le langage usuel ou bien au sein de la littérature scientifique. Ainsi, nous pouvons, par exemple, mentionner le cas de l'agilité et de la sensibilité (traduction littérale de « responsiveness »). [Bernardes and Hanna, 2009] soulignent ainsi, qu'au sein de la littérature, ces termes sont souvent utilisés afin de désigner les mêmes éléments; ceci rendant difficile leur différenciation. A travers une étude portant sur ces terminologies, ces auteurs relèvent que l'agilité est souvent associée à des phénomènes imprédictibles à la différence de la flexibilité, plus souvent considérée comme un moyen permettant de répondre ou d'anticiper la réalisation d'évènements dont l'ampleur est plus ou moins prévisible. Concernant la sensibilité, ils indiquent qu'en général celle-ci est liée avec la notion de stimuli et de temps. Partant de ces différentes analyses, ils proposent une définition relative à chacun de ces termes. Ainsi, la flexibilité est vue comme la capacité d'un système à évoluer dans le cadre d'un ensemble de situations envisagées. A l'inverse, l'agilité est définie comme la capacité à se reconfigurer face à des événements non prévus, ceci pouvant éventuellement se faire par le recours à des leviers de flexibilité. Pour une flexibilité ainsi qu'une agilité donnée, la sensibilité traduit, quant à elle, la capacité à identifier des variations de l'environnement et à mettre en œuvre les mesures correctrices. Elle relève, ainsi, plus du management que du système en lui-même. Cette distinction est conforme avec la définition proposée dans [More and Babu, 2009a] où les auteurs indiquent que la sensibilité correspond à la capacité des différents partenaires d'une Supply Chain à réagir d'une manière appropriée, dans un temps adéquate et à faible coût à toute variation du marché. A ce titre, elle ne peut, selon eux, être obtenue que si le système dispose de suffisamment de flexibilité ; l'inverse n'étant pas vrai. En plus de ces derniers, dans ce même article, les auteurs recensent d'autres termes, eux aussi souvent associés avec la notion de flexibilité , à savoir notamment la résilience désignant la capacité d'un système à évoluer au sein d'un environnement incertain et à rebondir en cas de difficultés majeures, l'élasticité correspondante à la facilité à revenir à son état initial suite à la prise de mesures correctrices afin de faire face à des variations de l'environnement ou encore la liquidité associée à la capacité d'un système à passer d'un état souhaité à un moment donné à un autre constituant une cible pour la période suivante. Remarquons que ces différents termes sont relativement aisés à définir au contraire de l'agilité et de la sensibilité qui, comme illustré précédemment, restent difficiles à différencier de la flexibilité.

Outre sa classification, un des premiers aspects relatifs à la flexibilité, venant à l'esprit est celui de son évaluation. En effet, cette opération est très importante puisqu'elle doit permettre de quantifier la performance d'un système et ainsi d'offrir les informations nécessaires aux décideurs afin de le piloter [Chan, 2003]. Ainsi, un nombre important de recherches ont été réalisées sur ce sujet comme illustré au sein de la partie suivante.

5.2. Modèles d'évaluation

L'évaluation de la flexibilité est, pour tout décideur, un élément important afin d'être à même de mesurer l'impact des différentes décisions et d'identifier celles à prendre à l'avenir. Dans le cadre d'une Supply Chain, ce processus d'évaluation prend un caractère particulier puisqu'il doit refléter les objectifs communs de l'ensemble des acteurs la composant et pas ceux de quelques entités seulement [Stradler and Kilger, 2002]. De par cette importance, ce processus a fait l'objet de nombreuses études débouchant sur autant de modèles et méthodes.

Récemment dans [Gong, 2008], un modèle analytique permettant d'établir le lien entre flexibilité et performance d'un système est proposé. Une étude similaire peut être retrouvée dans

[More and Babu, 2009b]. Celle-ci a pour objectif d'identifier les liens entre différents leviers de flexibilité et quelques indicateurs usuels pour la mesure de la performance d'une chaîne logistique tels que le chiffre d'affaire, le retour sur investissement ou encore les bénéfices avant impôts. Ainsi, par l'intermédiaire d'analyses statistiques telles que des analyses par composantes principales (ACP), pour chacun de ces derniers sont identifiés différents leviers de flexibilité ayant un impact direct sur leur valeur.

Dans [Benjaafar and Gupta, 1998], les auteurs étudient les liens entre la diversité de produits fabriqués au sein des usines et les modes de production adoptés. Plus précisément, ils cherchent à identifier les impacts que peuvent avoir des politiques de planification sur la mix flexibilité optimale. Ainsi, ils montrent la nécessité de considérer ces décisions simultanément sous peine d'aboutir à des systèmes sous-optimaux. Par exemple, le nombre de produits différents à fabriquer au sein d'une usine ne sera pas le même selon la fréquence de mise en production. En effet, plus celle-ci est élevée plus le nombre de périodes d'immobilisation des machines est lui aussi important. Par conséquent, il semble nécessaire de limiter la diversité fabriquée. Or, le nombre maximum de changements de production périodique autorisé est lui-même dépendant des tailles de lots. En effet, plus celles-ci seront petites plus les périodes couvertes par le stock généré seront faibles et donc plus les fréquences de mises en fabrication devront être importantes. Ainsi, tous ces paramètres sont liés entre eux, si bien que les auteurs soulignent l'importance de considérer simultanément la diversité des produits affectés à chaque usine et la flexibilité de l'appareil de production associé.

Quelques années plus tard, dans [Tang and Tomlin, 2008], a été réalisée une étude sur les liens entre flexibilité et performance d'une Supply Chain. Ainsi, après avoir énuméré un certain nombre de sources d'incertitudes auxquelles sont soumises les Supply Chain, les auteurs s'intéressent à trois d'entre elles, à savoir l'approvisionnement, la fabrication, dont les composantes sont la qualité, les délais ainsi que le respect des engagements, et la demande. Relativement à ces différents risques, ils étudient cinq types de stratégies afin d'y pallier. Ces dernières sont respectivement la multiplication des fournisseurs, l'établissement de contrats « souples » avec ces derniers, la mise en œuvre de procédés de fabrication flexibles, le retardement du point de différenciation des produits et le contrôle des prix afin de réduire ou augmenter la demande en fonction de la disponibilité des biens fabriqués. A travers une étude analytique, ils illustrent ainsi qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une Supply Chain pleinement flexible afin de pouvoir limiter un certain nombre de risques tels que ceux liés au niveau de la demande, aux délais de livraison ou encore aux incidents de production. En plus de ces différentes références, d'autres études relatives à l'évaluation de la flexibilité d'un système de production peuvent également être consultées dans ([Swamidass and Newell, 1987] ; [Wang and Chuu, 2004]; [Shuiabi et al., 2005]).

Ces différents modèles d'évaluation ont été, naturellement, complétés par d'autres études portant sur le dimensionnement de la flexibilité ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

5.3. Modèles de dimensionnement

Parallèlement aux différentes études relatives à l'évaluation de la flexibilité, d'autres travaux se sont intéressés à son dimensionnement. Les premiers ont concerné les unités de production (voir par exemple [Stecke, 1983]; [Boyer and Keong Leong, 1996][Browne et al., 1984] [Browne et al., 1984]) et plus précisément le choix entre investir dans des ressources dédiées ou flexibles plus coûteuses; le problème résidant dans l'évaluation économique de la diminution de la capacité totale à installer par le recours à des moyens de fabrication capables de produire différents types de biens [Chou et al., 2008].

Ce problème de choix entre machines dédiées et flexibles a, pour l'une des première fois, été traité dans [Fine and Freund, 1990] où les auteurs proposent un modèle stochastique en deux phases ; la première consistant à déterminer le volume de capacités dédiées et flexibles à installer et la seconde correspondante à la réalisation de la planification de la production une fois les données incertaines connues. Ces dernières correspondent au niveau réel de la demande représenté par l'intermédiaire d'une approche multiscénarios à chacun desquels est associée une probabilité de réalisation. Dans ce contexte, l'objectif associé correspond à la maximisation du profit c'est-à-dire de la différence entre le bénéfice espéré issu des ventes et les coûts fixes d'achat des ressources ainsi que variables liés à leur utilisation. Ce modèle est ensuite appliqué au cas d'une usine réalisant deux produits pouvant être fabriqués sur des machines dédiées ou sur une même ressource flexible. A travers différentes applications numériques, pour ce problème, les auteurs montrent qu'en cas d'une corrélation négative de la demande concernant ces deux produits, plus le niveau de l'incertitude est élevé plus le besoin en ressources flexibles est important, tandis que celui-ci est nul dans le cas d'une corrélation positive. A l'inverse, dans le cas d'une absence de liens entre la demande des différents produits, les résultats apparaissent moins tranchés. En effet, il semble que, jusqu'à un certain niveau d'incertitude, le besoin en terme de flexibilité soit nul alors qu'il augmente d'une façon importante passé cette borne pour ensuite diminuée au-delà d'un certain niveau de risque supérieur. De par cette analyse, les auteurs concluent sur l'impossibilité de décider des investissements à réaliser en termes de dimensionnement de ressources flexibles par l'unique prise en compte de la corrélation de la demande ainsi que du niveau de l'incertitude.

La même année, [Andreou, 1990] propose un modèle pour l'évaluation financière des bénéfices issus de l'installation de ressources flexibles dans le cadre d'un système de production à deux produits ayant des demandes corrélées et non connues précisément. Ainsi, considérant le niveau de l'incertitude, le coût des ressources flexibles et non flexibles ainsi que le chiffre d'affaire issu des ventes, ils montrent que l'optimum n'est pas atteint pour un système pleinement flexible mais pour un niveau intermédiaire. Deux années plus tard, dans [Gupta et al., 1992] ce même problème de décision d'investissements capacitaires a été couplé à une affectation de la production aux différentes ressources disponibles. Dans cet article, ces deux aspects sont séparés respectivement en un sous-problème d'investissement consistant, à partir d'une demande établie et d'un niveau de capacité initial, à définir le taux de ressources dédiées et flexibles supplémentaires à acquérir, et en un sous-problème de répartition de la production sur ces différentes capacités afin de satisfaire la demande. Ils sont parmi les premiers à avoir considéré la situation initiale comme un paramètre pouvant influencer les décisions à prendre. De plus, une fonction pour la prise en compte des temps de changement de production sur les différentes machines est définie.

En 1995, a été proposé un article très important dans le cadre de l'étude de la flexibilité au sein des systèmes de production [Jordan and Graves, 1995]. En effet, ces auteurs ont montré, à travers l'utilisation de la simulation, qu'un système partiellement flexible permettait d'obtenir un niveau de performance quasiment équivalent à un système l'étant pleinement. Ainsi, ils ont proposé la notion de structure partiellement chaînée (« sparse partial flexibility structure ») correspondante à un système dans lequel les produits sont reliés entre eux par l'intermédiaire des usines. Une telle organisation peut être représentée simplement par l'intermédiaire d'un graphe bipartite avec d'un côté les sommets correspondants aux produits et de l'autre ceux associés aux usines. Comme illustré sur la Figure 21, ceux-ci sont reliés par l'intermédiaire d'arcs représentant la possibilité de fabriquer un bien au sein d'une unité de production, de telle sorte que tous les sommets « produit » soient reliés entre eux directement ou indirectement par l'intermédiaire des nœuds usines. Une des clefs de cette structure est de permettre le partage des capacités de la chaîne entre tous les produits la composant.

Cet article a été le point de départ à de nombreuses recherches sur le problèmes de chaînage au sein d'un système, un bon aperçu pouvant être consulté dans [Chou et al., 2008]. Par exemple, cette problématique a été étendue, dans [Graves and Tomlin, 2003] au cas des Supply Chain multi-échelons et multi-produits.

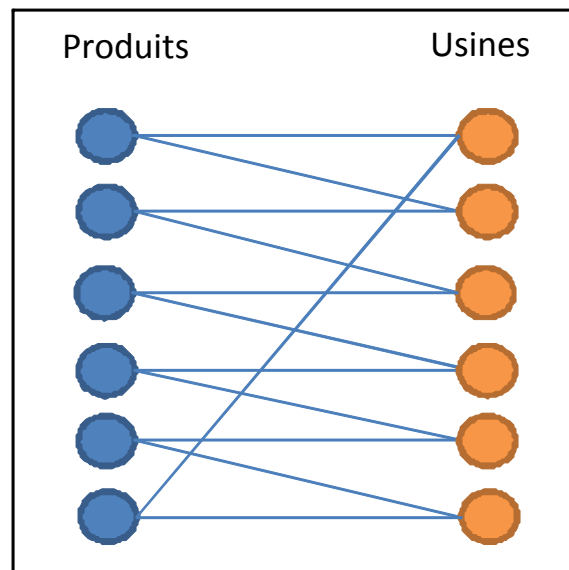


Figure 21 : Représentation d'une structure partiellement chaînée

Un autre exemple intéressant d'étude relative au dimensionnement de ressources flexibles peut être trouvé dans [Boyer and Keong Leong, 1996]. Celle-ci a la particularité de considérer les temps de changements de productions, sur les ressources flexibles, par l'intermédiaire d'une réduction de leurs capacités d'autant plus importante que le nombre de produits différents y étant fabriqués est grand. Le modèle à variable binaire ainsi proposé, dont l'objectif consiste à maximiser les quantités vendues espérées, est utilisé au sein d'un processus de simulation afin d'évaluer différentes configurations en termes de capacités allouées aux ressources flexibles et dédiées.

D'autres études ont été menées relativement au dimensionnement des ressources au sein d'un outil de production. Ainsi, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'influence de la flexibilité des machines sur les temps de fabrication des produits. Celles-ci se sont par exemple basées sur des modèles de Job-shop (voir par exemple [Wayson, 1965]; [Nelson, 1967]) mais ont également adressé des problèmes plus généraux. Cependant, cette problématique n'étant pas directement considérée dans le cadre de ces travaux de recherches, nous ne les aborderons pas d'une manière plus détaillée.

Le sujet du dimensionnement des ressources flexibles au sein d'un système de production n'est pas le seul à avoir été considéré. Ainsi, par exemple, dans ses travaux de thèse Cole [Cole, 1995] adresse le problème de dimensionnement des stocks de sécurité au sein d'une Supply Chain, composée d'usines et d'entrepôts et desservant un ensemble de zones client. Plus précisément, le modèle proposé consiste à déterminer le nombre d'entités à ouvrir ou fermer ainsi que leur emplacement, à affecter aux zones client un unique entrepôt pour chaque produit, à allouer la production de ces derniers ainsi qu'à déterminer le niveau des stocks de sécurité. Ces derniers sont, en effet, vus comme des leviers permettant de satisfaire un certain taux de service au client malgré les variations possibles de l'environnement. Ils sont définis pour chaque produit au sein de chaque entrepôt en fonction, notamment, des politiques managériales mises en œuvre au sein de ces derniers. Le modèle ainsi obtenu est résolu à l'aide du solveur Cplex, après que

celui-ci ait été linéarisé. Bien qu'intéressants, ces travaux peuvent difficilement faire l'objet d'une utilisation industrielle, notamment de par la prise en compte d'une unique période de temps.

Quelques années plus tard, dans [Bengston and Olhager, 2002], les auteurs étudient l'influence, sur la flexibilité d'un système de production, du nombre de produits différents fabriqués. Plus précisément, plusieurs aspects sont considérés à savoir la diversité du portefeuille produit proposé, le niveau de corrélation et l'homogénéité de la demande ou encore la différence entre cette dernière et la capacité disponible ; le tout vis-à-vis de trois options de production que sont la fabrication en interne de l'intégralité du portefeuille produits et l'externalisation, à deux niveaux différents, d'une partie de celui-ci. Pour ce faire, ils proposent une démarche relevant de "l'option pricing theory". Celle-ci consiste, pour chaque option envisagée, à déterminer par la résolution d'un modèle linéaire, pour chaque période de l'horizon considéré, le type de produits à fabriquer ainsi que les quantités associées afin de maximiser le profit ; celui-ci étant exprimé comme la différence entre le chiffre d'affaire et les coûts variables ainsi que de lancement de production. Ce modèle est ensuite intégré au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo permettant, notamment, de représenter l'incertitude sur la demande. A travers un exemple numérique, correspondant au cas d'une entreprise automobile, les auteurs montrent, notamment, que la flexibilité d'un système de production augmente lorsque la diversité de produits fabriqués est plus importante tandis qu'elle diminue d'autant plus que la demande est corrélée positivement et qu'elle est sujette à variations.

La simulation de Monte Carlo a également été utilisée dans le but de procéder au dimensionnement des capacités d'un système de production automobile dans [Chandra et al., 2005]. Dans cet article, les auteurs s'intéressent au problème d'évaluation et de dimensionnement de la flexibilité d'un système de production automobile dans le cadre d'une demande incertaine. Plus précisément, partant d'une affectation des véhicules aux usines donnée, définissant la mix flexibilité du système, ils ont pour objectif de déterminer la flexibilité volume de chaque usine ; celle-ci correspondante à l'écart entre la capacité disponible pour chaque véhicule et sa demande moyenne. Ainsi, ils proposent un processus de simulation de Monte Carlo consistant tout d'abord, pour une affectation de la production donnée, à générer des coefficients d'ajustements des capacités. Dans un second temps, la configuration ainsi obtenue est évaluée sur différents scénarios de demande ; l'évaluation consistant à déterminer le profit maximum défini comme la différence entre le chiffre d'affaire issu des ventes et les coûts relatifs aux extensions de capacité ainsi qu'aux heures supplémentaires. Ensuite, le profit espéré est calculé puis une nouvelle configuration de capacité est générée, à l'aide d'un algorithme génétique non explicité, et le processus réitéré. La démarche ainsi obtenue a été appliquée afin de résoudre un problème d'investissement capacitaire relatif au groupe automobile Ford. Bien qu'intéressante, cette approche est limitée par la prise en compte d'affectations de production figées, c'est-à-dire par le fait qu'aucun dimensionnement de la mix flexibilité n'est réalisé. De plus, aucune notion de stock n'est considérée, toute demande devant être satisfaite par la production effectuée lors de la même période.

La même année, [Askin et al., 2005] se sont également intéressés à la mix-flexibilité, c'est-à-dire au nombre d'endroits différents où peut être réalisé un même produit ou service. Plus précisément, ils ont cherchés à étudier les liens entre la flexibilité d'un système et de chacune des entités le composant. Pour se faire, ils considèrent un ensemble de « serveurs » étant soit dédiés soit flexibles c'est-à-dire capables d'utiliser une part de leur capacité pour la réalisation d'un autre service que celui leur étant initialement alloué ; ceci étant représenté par l'intermédiaire d'un graphe de flot maximum. Comparant, différents scénarios de niveau de demande, de flexibilité du système ainsi que des serveurs individuellement, les auteurs indiquent qu'il est important de prendre soin de bien dimensionner, à la fois, la flexibilité du système dans son ensemble mais également celle des différentes unités le composant. Un tel problème de dimensionnement de la

flexibilité au sein d'un système de production a également été considéré dans [Francas et al., 2011]. En effet, les auteurs y étudient, les liens entre le dimensionnement capacitaire d'usines et la flexibilité relative aux employés. Ce dernier point correspond à la possibilité de transférer les ouvriers entre les unités de production mais également à l'embauche d'intérimaires définissant la flexibilité volume. Ainsi, un MILP stochastique en deux phases est proposé afin de tenir compte de l'incertitude relative à la demande représentée sous la forme d'une approche multi-scénarios auxquels sont affectés différentes probabilités. Dans ce contexte, les variables de première phase concernent le dimensionnement capacitaire des usines ainsi que le nombre d'employés permanents à embaucher tandis que celles de seconde phase correspondent au recours à de la main d'œuvre intérimaire ainsi qu'au transfert des ouvriers permanents; le but étant de minimiser les coûts fixes et espérés associés. A travers un ensemble d'exemples numériques pour diverses configurations, en termes de produits différents pouvant être réalisés au sein des usines et de nombre maximum d'employés intérimaires pouvant être embauchés, les auteurs concluent que la mix flexibilité ainsi que la flexibilité volume se complètent bien mais ne se remplacent pas. Autrement dit, ils indiquent qu'il est préférable de disposer d'un peu de ces deux types de flexibilité plutôt que beaucoup d'un seul. Notons que ces tests ont, au plus, considérés 10 produits et 10 usines. De plus, il convient de remarquer que le modèle proposé est monopériode. Par conséquent, le transfert des ouvriers consiste juste à modifier le dimensionnement initial du système de production en fonction des besoins pour cette unique période. Aussi, cet aspect monopériode limite grandement la portée des résultats ainsi que la possibilité d'utiliser ce modèle dans le cadre du SCND afin de tenir compte de la possibilité offerte par les transferts de ressource en termes de pilotage et de diminution des investissements. En outre, les employés sont, ici, supposés capables de réaliser n'importe quel type de fabrication, ce qui dans bien des cas constitue une hypothèse non valide.

Dans [Das, 2011] sont proposés un modèle et une démarche pour le dimensionnement de la flexibilité, non pas dans le cadre d'un système de production mais d'une Supply Chain à quatre niveaux. Ainsi, partant d'une estimation de la variation de la demande future, un taux de service optimal à assurer est défini pour chaque produit et chaque matière première. Ce choix permet ensuite de déterminer le taux de flexibilité à installer pour la distribution et l'approvisionnement de ces éléments. Ceci se traduit alors par la définition de surplus de production à réaliser afin de satisfaire le taux de service précédemment déterminé. Malheureusement, seules les variations positives de la demande sont représentées tandis que les stocks ne sont pas considérés, hormis ceux de sécurité.

Récemment, [Schneider et al., 2013] ont considéré le problème de dimensionnement de la mix flexibilité d'un système de production. Celui-ci consiste en une affectation, aux différentes ressources disponibles (machines au sein des usines,...), d'un ou plusieurs types de produits ; définissant la capacité du système à adapter sa capacité en fonction de la demande réelle par le biais de transferts de charge. Dans ce contexte, l'objectif est de maximiser le profit, celui-ci étant exprimé comme la différence entre les coûts issus de l'affectation de différents types de produits aux ressources et le chiffre d'affaire espéré calculé sur un ensemble de scénarios de demande. Ce modèle stochastique en deux phases est résolu à l'aide d'un algorithme génétique couplé à un modèle linéaire. Plus précisément, différentes solutions d'affectations produits-ressources sont générées à l'aide de l'algorithme génétique ; ces dernières étant alors évaluées à travers la réalisation d'une planification monopériode par l'intermédiaire d'un modèle linéaire. L'originalité de l'article réside dans la manière avec laquelle est définie la population initiale. En effet, celle-ci est générée en considérant un certain nombre de critères obtenus par la réalisation d'une phase préliminaire d'identification des similitudes entre affectations de bonnes qualités.

Outre ces différents travaux, d'autres ont porté sur des formes plus originales de flexibilité. Par exemple, dans [Shen, 2006], est proposé un modèle permettant de discriminer les différentes

demandes entre elles ; ceci aboutissant à la détermination des clients à servir et, à fortiori, de ceux à ne pas satisfaire. Ainsi, l'auteur propose un modèle consistant à définir les entrepôts à établir ainsi que la demande à satisfaire à partir de ces derniers ; ceux-ci étant supposés alimentés par une unique usine à capacité infinie. Dans ce contexte, l'objectif consiste à maximiser le profit considéré comme la différence entre le chiffre d'affaire issu de la vente des produits et les coûts de transport, d'ouverture des entrepôts ainsi que de stockage. Une des particularités de l'approche proposée est d'imposer de satisfaire pleinement la demande de chaque client ou bien de ne pas le servir, de telle façon que le problème a pu être exprimé comme un « set covering problem ». Celui-ci est résolu à l'aide d'un algorithme de génération de colonnes explicite. Remarquons que dans le cadre de ce manuscrit, nous ne considérons pas ceci comme un dimensionnement de la flexibilité à proprement parlé. En effet, il s'agit selon nous plutôt d'une démarche managériale, pouvant être motivée par la résolution de problèmes de maximisation du profit tel que ceux indiqués précédemment. Cependant, il convient de noter qu'il apparaît important de tenir compte d'une telle éventualité lors du dimensionnement d'un système et, à fortiori, de sa flexibilité.

Une autre forme de flexibilité relativement bien étudiée est celle associée aux liens clients - fournisseurs. Celle-ci consiste à évaluer les impacts des contrats liant les deux parties sur le fonctionnement de la Supply Chain. Dans ce contexte, les éléments les plus étudiés ont concerné la durée de ces partenariats, les quantités minimum à livrer, les délais de livraisons, les coûts issus du non-respect des valeurs contractuelles ainsi que le niveau de flexibilité de ces dernières. Une telle étude peut par exemple être trouvée dans [Das and Abdel-Malek, 2003]. Ces auteurs considèrent, en effet, la robustesse du lien entre fournisseurs et acheteurs comme l'élément le plus important dans la flexibilité d'une Supply Chain. Ainsi, afin d'estimer le niveau de cette dernière, ils proposent une fonction basée sur les valeurs contractualisées, entre l'acheteur et le fournisseur, des quantités minimales à livrer ainsi que du lead-time minimal qui définissent les limites que le fournisseur doit respecter sous peine de payer des pénalités (contraintes de quantités et de lead time) ; ces deux éléments constituant, selon eux, les deux sources majeures de conflit intervenant au d'une Supply Chain. D'autres études, relativement récentes, portant sur le même sujet peuvent, par exemple, être consultées dans [Li and Kouvelis, 1999]; [Cachon and Lariviere, 2001].

Les différentes références introduites au cours de cette dernière partie complètent bien celles présentées précédemment dans le sens où elles abordent la notion de flexibilité. Cependant, à l'inverse, elles adressent un plus faible nombre de paramètres liés au SCND. Par exemple, hormis [Francas et al., 2011], à notre connaissance aucune autre étude traitant de la flexibilité ne considère le problème de transferts de ressources. Remarquons d'ailleurs que cet article ne peut être utilisé afin de résoudre notre problème puisque les ressources correspondent à des employés dont le nombre total peut être ajusté rapidement et à faible coût ; ce qui ne correspond pas au type de celles considérées dans le cadre de nos travaux. En effet, comme indiqué précédemment, celles-ci sont spécifiques et engendrent des investissements relativement conséquents nécessitant non pas un ajustement périodique mais, au contraire, une décision long terme. De plus, cet article ne tient pas compte d'autres paramètres tels que la standardisation, interdisant d'autant plus son utilisation afin de résoudre le problème considéré dans le cadre de ces travaux de thèse.

5.4. Conclusion

Au cours de cette partie, ont été recensés différents articles traitant de la flexibilité au sein d'une Supply Chain. Ainsi, ont été distingués les études portant sur sa définition ([Sethi and Sethi, 1990], [Gerwin, 1987], [Gerwin, 1993],...), sur son évaluation ([Benjaafar and Gupta, 1998], [Stadler and Kilger, 2001], [Gong, 2008],...) ainsi que sur son dimensionnement ([Fine and Freund, 1990], [Gupta et al., 1992], [Bengston and Olhager, 2002], [Chou et al., 2008],...). Bien entendu, de par la nature même du problème adressé dans le cadre de cette thèse ; seuls les modèles appartenant à cette dernière catégorie sont susceptibles d'être utilisés ici. Comme illustré au cours de la partie 5.3, ceux-ci adressent un certain nombre de décisions telles que l'achat de ressources flexibles, le dimensionnement des stocks de sécurité ou encore celui de la mix flexibilité par l'affectation de la production de mêmes produits à différentes entités. Malgré cette diversité d'éléments considérés, à notre connaissance aucun des modèles existant ne permet de résoudre pleinement le problème adressé dans ce document. En effet, ceux-ci considèrent certes la majorité des éléments adressés ici mais séparément. Par exemple, aucun ne tient compte simultanément d'une configuration initiale restreignant l'espace de recherche des solutions et de la standardisation des produits. Or, ces aspects sont relativement importants puisque, comme indiqué précédemment, il est crucial au cours d'un dimensionnement de la flexibilité, notamment lors de la définition du nombre et du type de ressources à acquérir, de tenir compte de la diversité de produits fabriqués au sein des différentes entités. En effet, cette dernière engendre des pertes de capacité, correspondante aux temps d'adaptation des machines afin de passer de la production d'un élément à celle d'un autre, différentes selon la proximité des produits fabriqués. Par conséquent, il convient, même à un horizon stratégique, de tenir compte de tels aspects dans le but de ne pas aboutir à des situations de sous-capacités. Un autre élément limitant l'utilisation des modèles précédemment introduits provient de l'absence de prise en compte des potentiels transferts de ressources. En effet, à notre connaissance, seul [Francas et al., 2011] tient compte simultanément de cette possibilité et du dimensionnement de la flexibilité. Cependant, sont ici considérés des ouvriers ce qui, comme indiqué précédemment, correspond à des ressources présentant des caractéristiques différentes de celles adressées dans le cadre de nos travaux de thèse.

Les trois parties précédentes ont eu pour objectif de donner un aperçu le plus exhaustif possible des différentes études relatives au SCND, que cela soit dans un contexte déterministe ou incertain. De plus, a également été abordé le thème lié au dimensionnement de la flexibilité. Outre une vision critique des articles relatifs au Supply Chain Network, cet état de l'art permet également de situer les travaux réalisés, dans le cadre de ce doctorat, au sein de la littérature scientifique et ainsi d'identifier leurs éventuels apports ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

6. Positionnement de nos travaux au sein de la littérature : conclusion

L'état de l'art, constitué des trois parties précédentes, n'a pas pour prétention de lister d'une manière exhaustive l'ensemble des travaux réalisés relativement au SCND. Par contre, il a pour objectif de donner un aperçu, le plus réel possible, des thématiques et orientations de recherche prises durant ces dernières années. Ainsi, suite à sa réalisation, les différents articles recensés ont été répertoriés au sein du tableau comparatif (Tableau 2) donné ci-dessous. Celui-ci a été défini à partir de l'analyse de la littérature relative au SCND. Plus précisément, compte tenu des différents paramètres mis en évidences au sein de cet état de l'art et des caractéristiques de nos travaux de recherche, les différents articles ont été comparés vis-à-vis de différents critères que sont :

- (i) le nombre de niveau de la Supply Chain considéré ;

- (ii) le nombre de produits (problème multi-produits ou non) ;
- (iii) le nombre de périodes (problème multi-périodes ou non) ;
- (iv) la prise en compte de la notion de flexibilité ;
- (v) la nature du contexte (déterministe v.s. incertain) ;
- (vi) la nature des décisions considérées (localisation d'entités, affectation des productions aux usines, planification de la production) ;
- (vii) la prise en compte d'une solution initiale pouvant être énoncée comme le fait de procéder à une reconfiguration d'une Supply Chain existante ;
- (viii) la prise en compte de la notion de standardisation ;
- (ix) les notions de pertes de capacité ;
- (x) les coûts de stockage ;
- (xi) le dimensionnement et le déploiement des capacités (regroupés sous le terme « dimensionnement capacitaire ») ;
- (xii) la prise en compte des potentiels transferts de ressources ;
- (xiii) la notion de capabilité technique correspondante au fait que certains moyens de production sont dédiés à la production d'un ensemble restreint de produits.

A travers l'analyse de ce tableau et au regard des treize critères de comparaison retenus, le premier constat pouvant être dressé correspond au fait que la majorité des contraintes et paramètres du problème considéré dans le cadre de nos travaux de recherche ont également été abordés au sein de la littérature scientifique. Cependant, ceux-ci l'ont été d'une manière disparate, c'est-à-dire qu'aucun article ne les adresse simultanément. Par exemple, aucune étude ne prend en compte simultanément le dimensionnement de ressources, de la mix-flexibilité ainsi que les aspects liés à la standardisation. De plus, à notre connaissance, aucune référence ne considère le problème de gestion des ressources d'une manière similaire à la nôtre. En effet, très peu considèrent les potentiels transferts de ces dernières entre les différentes entités. A notre connaissance, les seules références adressant cette possibilité, dans un contexte stratégique, sont [Paquet et al., 2008] et [Francas et al., 2011]. Or, au sein de ces articles, les ressources considérées sont des ouvriers pouvant, certes, faire l'objet de transferts entre les différentes usines, mais dont le nombre peut également être ajusté périodiquement par le recours à des employés intérimaires. De plus, ils sont supposés également capables de réaliser n'importe quel type de produit, ce qui constitue une limite relativement importante. Notons que dans [Paquet et al., 2008] sont également considérées des machines pouvant, elles aussi, être vendues, achetées ou transférées entre les périodes et, tout ceci, dans une certaine limite imposée par des bornes maximales. Ainsi, ces différentes études font l'hypothèse de ressources non dédiées et pouvant être achetées ou vendues périodiquement. Autrement dit, elles ne peuvent être appliquées dans le cadre de nos travaux où ces dernières sont spécifiques à une entreprise et à un type de produit et donc non vendables et coûteuses. Plus précisément, ces modèles ne peuvent être utilisés afin de résoudre un problème où les transferts de ressources sont considérés comme des éléments tactiques de pilotage d'une Supply Chain dont il convient de tenir compte lors de la planification stratégique afin de réduire les différents investissements tout en garantissant la pertinence, sur le long terme, des dimensionnements ainsi définis.

Il convient également de rappeler que, comme indiqué précédemment, les transferts de ressources ont également été considérés dans un contexte tactique (voir par exemple [Aghezzaf, 2007]; [Wang and Chen, 2009]). Cependant, de par l'horizon considéré, ces derniers ne procèdent à aucun dimensionnement tandis que les ressources ne sont en générales pas dédiées. Cette

inadaptation des modèles existants à notre problématique est également due à la prise en compte de l'incertitude sur la demande. En effet, hormis [Francas et al., 2011], ces derniers considèrent tous un environnement déterministe. Soulignons également que cette inadaptation apparaît également au niveau de l'affectation des productions qui, dans notre cas, est considérée comme une décision long terme contraignant les potentiels transferts de ressources et devant donc être prises simultanément avec leur dimensionnement.

Un autre aspect important de cet état de l'art correspond à l'absence de prise en compte de la notion de standardisation. En effet, alors même que des recherches ont été menées sur ce sujet (voir par exemple [Baud-Lavigne et al., 2011] et [Lamothe et al., 2006]), à notre connaissance seul un article relatif au SCND sous contrainte d'incertitude aborde cette notion [Chandra et al., 2005]. Or, ce dernier souffre d'un certain nombre de simplifications telles que la prise en compte de l'affectation des productions comme une donnée d'entrée et non une variable de décision ainsi que l'absence de notion de ressources transférables.

Au-delà de ces différents éléments, de par l'analyse du Tableau 2, nous pouvons également constater que très peu de travaux abordent la notion de solution initiale. Plus précisément, seuls quatre considèrent cet aspect, soit comme une contrainte limitant l'espace de recherche soit comme un paramètre ayant une influence directe sur la valeur de la fonction objectif. Or, cette notion est très importante dans le cadre de problèmes réels ; la majorité des Supply Chain n'étant pas créées de toutes pièces mais à partir d'entités préexistantes. Autrement dit, dans le cadre du SCND, les décisions relèvent plutôt de la reconfiguration d'un système existant que de la construction d'un nouveau.

A travers ces différentes remarques, nous pouvons constater que la majorité des contraintes, du problème d'affectation stratégique des productions et de dimensionnement de la flexibilité ainsi que des ressources du système de production d'une Supply Chain adressé dans le cadre de ces travaux de thèses, ont fait l'objet de recherches. Cependant, ceux-ci n'ont, à notre connaissance, jamais été abordés simultanément. De plus, aucune étude n'adresse le transfert de ressources, onéreuses et dont le nombre ne peut être ajusté périodiquement, comme un élément à considérer dans le cadre d'un dimensionnement long terme dans le but de diminuer les investissements à réaliser tout en garantissant le bon fonctionnement du système et, ceci, dans un environnement incertain. Ainsi, les travaux présentés au sein de ce document ont pour objectif de combler ce manque. Partant de ces différents éléments ainsi que ceux présentés dans le premier chapitre, la problématique considérée peut être définie comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain.

Conformément aux éléments indiqués au sein de ce chapitre ainsi que du précédent, le problème ASPDRF ainsi défini correspond à un problème d'affectation long terme des productions aux usines du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain. A celui-ci est associé un certain nombre de contraintes liées aux capacités et capacités techniques des moyens de production, à la gestion de ressources spécifiques à un ou plusieurs produits (capacités, transferts, quantités minimum), à la standardisation des produits se traduisant par des pertes de capacité, à la notion de configuration initiale se traduisant par une limitation de la diversité des solutions pouvant être proposées afin de tenir compte de contraintes budgétaires, (notamment de liquidité disponible) interdisant de transformer totalement la Supply Chain. Notons également, qu'à ce problème est associé le fait que les modèles et méthodes développés afin de le résoudre doivent être capables d'adresser des problèmes de grandes tailles ; ceci provenant du caractère industriel de nos travaux.

Articles	Nombre de niveaux de la Supply Chain	Multi-produits	Multi-périodes	Flexibilité	Contexte (Déterministe : D / Incertain : I)	Localisation d'entités	Affectation produit	Planification	Reconfiguration (départ solution initiale)	Standardisation produits	Pertes de capacités liées à la standardisation	Contraintes de capacités	Coûts de stockages	Dimensionnement capacitaire	Transferts de ressources	Capabilité technique
Travaux de thèses	1	X	X	X	I		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ahmed S., King A. J., Parija G. (2003). Global Optimization 26, pp 3–24.	1		X		I							X		X		
Aghezzaf E.H. (2007).	3	X	X		D	X	X	X				X	X	X	X	
Altıparmak F., Gen M., Lin Lin, Karaoglan I. (2009).	3	X			D	X	X					X				
Amrani H., Martel A., Zufferey N., Makeeva P. (2011).	3	X			D	X	X	X				X				
Aksin, O.Z., Karaesmen, F., Ormeci, E.L., (2005).	2	X		X	I			X				X				
Badri H., Bashiri M. and Hejazi T. H. (2012).	4	X			D	X	X	X				X	X			
Bhutta, K.S., Huq F., Frazier G., Mohamed Z. (2003)	2	X	X		D		X	X				X	X	X		
Bok, J., Lee H. and Park S. (1998).	1	X	X		I			X				X		X		
Brown G.G., Graves G.W., Honczarenko M.D. (1987).	2	X			D	X	X	X				X		X		

Articles	Nombre de niveaux de la Supply Chain	Multi-produits	Multi –périodes	Flexibilité	Contexte (Déterministe : D / Incertain : I)	Localisation d'entités	Affectation produit	Planification	Reconfiguration (départ solution initiale)	Standardisation produits	Pertes de capacités liées à la standardisation	Contraintes de capacités	Coûts de stockages	Dimensionnement capacitaire	Transferts de ressources	Capabilité technique
Baghalian A., Rezapour S., Farahani R.Z. (2013).	3	X			I	X	X	X				X	X			
Bengtsson J., Olhager J. (2002).	3	X			I			X				X				
Bihandi H. M., Yusuff R. M., (2011).	3	X			I	X	X	X				X				
Carle M.A., Martel A., Zufferey N. (2012).	4	X	X		D	X	X	X				X	X			
Chandra C., Everson M., Grabis J. (2005).	1	X	X	X	I			X		X		X				
Cohen M.A., Lee H.L. (1989).	3	X			D		X	X				X	X	X		X
Cohen, M.A., Fisher, M.L., Jaikumar, R. (1989).	3	X	X		D	X	X	X				X				
Cole M.H. (1995).	3	X		X	D	X	X	X				X	X			
Cordeau, J.-F., Pasin F. et Solomon M. (2006).	3	X			D	X	X	X				X				
Correia, I., Melo, T., Saldanha-da-Gamac, F. (2012).	2	X	X		D	X	X	X					X			

Articles	Nombre de niveaux de la Supply Chain	Multi-produits	Multi-périodes	Flexibilité	Contexte (Déterministe : D / Incertain : I)	Localisation d'entités	Affectation produit	Planification	Reconfiguration (départ solution initiale)	Standardisation produits	Pertes de capacités liées à la standardisation	Contraintes de capacités	Coûts de stockages	Dimensionnement capacitaire	Transferts de ressources	Capabilité technique
Das . (2011).	3	X	X	X	I	X	X	X				X	X			
Francas D., Löhndorf N., Minner S. (2011).	1	X		X	I		X	x				X		X	X	X
Fine C.H., Freund R.M. (1990).	1	X		X	I			X				X		X		
Gebennini, Gamberini R., Manzini R (2009).	4		X	X	D	X		X				X	X			
Geoffrion A. M., Graves G.W. (1974).	2	X			D	X		X				X				
Georgiadis M.C., Panagiotis T, Longinidis P., Sofioglou (2011).	4	X	X		I	X	X	X				X	X			X
Guillén G., Mele F.D., Bagajewicz M.J., Espuña A., Puigjaner L.(2005).	3	X	X		I	X	X	X				X	X			
Guinet. (2001)	1	X	X		D		X	X				X	X			
Gupta D., Gerchakb Y., Buzacott J. A. (1992)	1	X		X	I		X		X		X	X				X
Gutierrez, G.J., Kouvelis P. and Kurawala A. (1996).	infini	X			I	x	x	x								

Articles	Nombre de niveaux de la Supply Chain	Multi-produits	Multi-périodes	Flexibilité	Contexte (Déterministe : D / Incertain : I)	Localisation d'entités	Affectation produit	Planification	Reconfiguration (départ solution initiale)	Standardisation produits	Pertes de capacités liées à la standardisation	Contraintes de capacités	Coûts de stockages	Dimensionnement capacitaire	Transferts de ressources	Capabilité technique
Hinojosa Y., Puerto J., Fernandez F.R. (2000).	2	X	X		D	X		X	X			X				
Jayaraman V., Pirkul H., (2001).	3	x			D	X	X	X				X				
P. Longinidis, M. C. Georgiadis (2011).	4	x	x		I	X	X	X				X	X			X
Manzani R., Gamberi M., Gebennini E., Regattieri A., (2008).	4		x		I	X	X	X				X	X			
Melo M.T., Nickel S., Saldanha Da Gama F. (2005).	3	X	X		D	X	X	X	X			X	X			
Paquet M., Martel A., Montreuil B. (2008).	2	X	X		D		X	X	X			X		X	X	X
Pishvae Mir Saman, Rabbani Masoud, Torabi Seyed Ali (2011).	3				I	X	X	X				X				
Tsiakis P., Shah N., Pantelides C. C. (2001).	4	X			I	X	X					X		X		X
Tsiakis et al. (2008)	2	X			D	X	X	X			X	X				X
Schneider M., Grahl J., Francas D., Vigo D. (2013).	1	X			I		X	X				X				

Articles	Capabilité technique	Transferts de ressources	Dimensionnement capacitaire	Coûts de stockages	Contraintes de capacités	Pertes de capacités liées à la standardisation	Standardisation produits	Reconfiguration (départ solution initiale)	Planification	Affectation produit	Localisation d'entités	Contexte (Déterministe : D / Incertain : I)	Flexibilité	Multi-périodes	Multi-produits	Nombre de niveaux de la Supply Chain
Verter V., 2002.			X		X					X	X	D			X	2
Vila, D., Martel A. and Beauregard R. (2009).	X		X	X	X				X	X	X	I		X	X	3
Yu C.-S. et Li H.-L. (2000).					X				X	X		I				3

Tableau 2 : Tableau comparatif des principales références constituant l'état de l'art

7. Conclusion

La réalisation de ce second chapitre a répondu à la volonté de recenser les différents articles relatifs au Supply Chain Network Design (SCND) pouvant être trouvés au sein de la littérature scientifique. Plus précisément, il s’agissait d’identifier les principales thématiques de recherche liées au SCND ayant fait l’objet de travaux de recherches et de définir le plus fidèlement possible les différents paramètres et contraintes associés. Au-delà, de la simple critique de la littérature existante, cet état de l’art avait pour objectif de montrer l’impossibilité d’utiliser les modèles et méthodes existantes afin de résoudre le problème adressé dans le cadre de ce doctorat et ainsi de mettre en évidence l’apport de nos travaux.

Dans ce contexte, le concept de Supply Chain Network Design a été défini comme un processus décisionnel intégré traitant l’ensemble des activités (approvisionnement, production, distribution...) d’une Supply Chain [Lin and Wang, 2011]. De par ce nombre important de métiers concernés et par conséquent de types de décisions associés, différentes problématiques au regard desquelles a été analysée la littérature scientifique ont été recensées. Celles-ci correspondent à la localisation des entités constituant une Supply Chain (Facility Location Problem, FLP, [Klose and Drexel, 2005]), au choix des acteurs rentrant dans la composition d’une Supply Chain (relations clients – fournisseurs), à la planification long terme et moyen terme des activités d’une Supply Chain et ses différentes déclinaisons (fermeture et ouverture d’entités, réalisation du Plan Industriel et Commercial, réalisation du Programme Directeur de Production) et au dimensionnement des capacités ainsi que de la flexibilité. Afin de procéder à une analyse pertinente de la littérature vis-à-vis de ces problématiques, les différents articles ont été regroupés selon le contexte considéré à savoir un contexte certain, incertain ainsi que selon la prise en compte ou non de la notion de flexibilité.

La réalisation de cet état de l’art a permis de mettre en évidence le nombre important de recherches réalisées dans un contexte déterministe notamment vis-à-vis de l’affectation des productions ainsi que du dimensionnement capacitaire. A contrario, très peu d’articles traitant la notion de transferts de ressources dans un cadre stratégique ont pu être trouvés ; le seul recenser étant [Paquet et al., 2004]. Or, les auteurs font l’hypothèse de ressources, d’une part, non spécifiques mais pouvant être utilisées afin de fabriquer tout type de produit et, d’autre part, dont le nombre total peut être ajusté périodiquement sans entraîner de surcoûts importants. Par conséquent, ils ne procèdent pas à un dimensionnement long terme mais adressent la notion de ressources d’une manière similaire aux modèles de planification tactique considérant leur potentiel transferts entre usines et entrepôts (voir par exemple [Aghezzaf, 2007] et [Wang and Chen, 2009]).

En ce qui concerne le SCND dans un contexte incertain, bien que le nombre total d’articles pouvant être trouvés est plus faible que dans le cas d’un environnement déterministe, les mêmes constats que précédemment peuvent être dressés. Ainsi, là aussi la majorité des articles traitent principalement de la localisation, de la fermeture et de l’ouverture d’entités (usines, entrepôts,...) et de leur dimensionnement capacitaire. Bien qu’un tel dimensionnement puisse prendre la forme de la définition du nombre à acquérir, très peu d’articles considèrent dans ce contexte la notion de ressources et encore moins leurs potentiels transferts. Au-delà de ces similarités avec elles, les travaux relatifs au SCND dans un contexte incertain diffèrent des études réalisées dans un contexte déterministe, par la nature des modèles et méthodes utilisées. Ainsi, la majorité d’entre eux recourt à la programmation stochastique ([Sahinidis, 2004]) sous ses différentes déclinaisons tandis que les méthodes de résolutions utilisées font soit appel à la simulation (méthode de

simulation de Monte Carlo, Sample Average Approach) soit correspondent à des métaheuristiques.

Bien que eux aussi associés à un contexte incertain, les articles tenant compte de la notion de flexibilité s'avèrent beaucoup moins nombreux. Parmi ces derniers, un nombre conséquent s'attache aux aspects sémantiques de la flexibilité, que cela soit pour la définir ([Upton, 1994], [Mandelbaum and Buzacott, 1990], [Mahapatra and Melnyk, 2000],...), la classifier ([Khoste and Malhotra, 1999], [Beach et al., 2000]), définir les différentes formes qu'elle peut prendre ([Sethi and Sethi, 1990], [Gerwin, 1987], [Gerwin, 1993],...) ou encore la différencier avec d'autres termes, tels que ceux de volatilité et variabilité, avec lesquels elle est souvent confondue au sein de la littérature ([Bernardes and Hanna, 2009], [More and Babu, 2009b]). A côté de ces articles se trouvent également d'autres relatifs à son évaluation (par exemple [Swamidass and Newell, 1987], [Gong, 2008], [Tang and Tomlin, 2008]) ainsi qu'à son dimensionnement. Ces derniers ont tout d'abord concerné le choix entre investir dans des ressources flexibles ou bien dédiées ([Fine and Freund, 1990], [Andreou, 1990], [Jordan and Graves, 1995]). Ensuite ont été considérées d'autres formes de flexibilité telles que la mix flexibilité et la flexibilité volume (voir par exemple [Chandra et al., 2005], [Das, 2011] ou encore [Schneider et al., 2013]). A ces études s'ajoutent également d'autres portant sur des formes plus originales de flexibilité liées aux choix des clients à ne pas satisfaire ([Shen, 2006]) ou encore à l'importance des liens clients-fournisseurs établis par l'intermédiaire de contrats spécifiques ([Das and Abdel-Malek, 2003], [Cachon and Lariviere, 2001]...). Bien entendu, ces différentes décisions liées à la flexibilité ont été couplées avec d'autres relatives, par exemple, à la localisation, à la fermeture et à l'ouverture des usines, à l'affectation des productions ou encore au dimensionnement des capacités. Notons que, malgré le fait que ce dimensionnement capacitaire puisse prendre la forme de la définition du nombre de ressources à acquérir, comme précédemment, très peu d'articles considèrent leur potentiel transfert au niveau tactique, comme un levier à adresser dans le cadre stratégique afin de diminuer le nombre à acquérir. A ce propos, remarquons que l'unique article, tenant compte de cet aspect, recenser ([Francas et al., 2011]) fait là encore l'hypothèse de ressources non spécifiques dont le nombre total peut être modifié périodiquement et dont, par conséquent, le dimensionnement ne relève pas réellement d'une décisions long terme.

Suite à la réalisation de cet état de l'art a été proposé un tableau récapitulatif permettant une comparaison rapide des différents articles référencés vis-à-vis de 13 critères que sont le nombre de niveau de la Supply Chain considéré, le caractère mono ou multi-produits, le caractère mono ou multi-périodes, le contexte (déterministe ou incertain), la prise en compte de la notion de flexibilité, le type de décisions prises (localisation des entités, affectation des productions, planification de la production), la prise en compte d'une solution initiale, de la standardisation et des pertes de capacités associées, le dimensionnement capacitaire, la notion de transferts de ressources et la prise en compte des capacités techniques des moyens de production. A l'aide de ce tableau deux constats principaux ont pu être dressés. Le premier correspond au fait que la majorité des paramètres et contraintes considérés dans nos travaux ont été adressés au sein de la littérature scientifique mais d'une manière disparate, c'est-à-dire jamais simultanément au sein d'un même article. Par exemple, alors même que la standardisation a fait l'objet d'un certain nombre de recherches (voir par exemple [Lamothe et al., 2006]), très peu d'articles adresse simultanément cet aspect avec d'autres décisions telles que l'affectation des productions aux usines ou encore les pertes de capacités inhérentes à la diversité de produits fabriqués sur un même moyen de fabrication. Le second constat, quant à lui, est relatif à la gestion des ressources. Ainsi, il apparaît qu'alors même que très peu d'articles adressent leurs transferts dans un contexte stratégique, les seuls à le faire font l'hypothèse de ressources d'une part non spécifiques mais également dont le nombre total peut être ajusté périodiquement. Autrement dit, ces modèles ne réalisent pas un réel dimensionnement long terme des ressources et, par conséquent, ne peuvent être utilisés dans notre cas où les potentiels transferts, réalisables au niveau tactique, sont vus

comme un levier devant être considéré lors de la planification stratégique afin de diminuer les investissements relatifs à l'achat des ressources.

Compte tenu des différents points répertoriés au sein du tableau récapitulatif et des constats associés, nous avons conclu à l'impossibilité d'utiliser les modèles existant afin de résoudre le problème adressé dans le cadre de ce doctorat et, par conséquent, mis en évidence l'apport de nos travaux de recherche. Partant de ce constat la problématique adressée a été formulée comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain. Celui-ci correspond à un problème d'affectation long terme des produits aux usines tenant compte de divers paramètres et contraintes telles que ceux relatifs aux capacités et capacités techniques des moyens de production, au dimensionnement et à la gestion de ressources dédiées, à la notion de standardisation ainsi qu'aux pertes de capacités associées ainsi qu'à la prise en compte d'une solution initiale. A ces éléments, compte tenu du caractère industriel de nos travaux, s'ajoute la nécessité de créer des modèles et méthodes capables d'adresser des problèmes de grandes tailles.

Maintenant que l'apport de nos travaux de recherche a été identifié et que ceux-ci ont été reformulé comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain, il convient de s'intéresser à sa modélisation mathématique ; celle-ci permettant notamment d'approfondir la définition des différentes contraintes et paramètres associés.

Chapitre III : Modélisation du problème ASPDRF dans un contexte déterministe

Partant de la présentation du problème et de l'état de l'art réalisé, respectivement, dans le premier et le second, ce troisième chapitre a pour objectif d'introduire la façon avec laquelle ont été appréhendées les différentes contraintes industrielles. Ainsi, il présente les approximations réalisées ainsi que la manière avec laquelle elles ont été modélisées. Aussi sont proposées tour à tour une formulation mathématique du problème ASPDRF puis une linéarisation de celle-ci sous la forme d'un programme linéaire mix en nombre entier (MILP) ; ce dernier faisant ensuite l'objet de différentes applications numériques.

Sommaire

Chapitre III : Modélisation du problème ASPDRF dans un contexte déterministe	83
1. Introduction	87
2. Modélisation des contraintes industrielles	87
2.1. Modélisation du système de production d'une Supply Chain	88
2.2. Notations.....	89
2.2.1. Ensembles.....	89
2.2.2. Paramètres	89
2.2.3. Variables.....	90
2.3. Modélisation des contraintes de ressources.....	91
2.3.1. Les contraintes de dimensionnement	91
2.3.2. Evaluation du nombre de transferts de ressources	93
2.4. Prise en compte d'une solution initiale.....	93
2.4.1. Limitation du nombre de modifications pouvant être apportées à la solution initiale	93
2.4.2. Nombre limite d'agrégats multi-affectés.....	94
2.4.3. Modification du dimensionnement des ressources initial	95
2.4.4. Contraintes relatives à la gestion des nouveaux agrégats produits	95
2.5. Standardisation : temps de changements de dimension et flexibilité des lignes de production.....	96
2.6. Fonction objectif : maximisation du profit	97
2.7. Formalisation mathématique	99
3. Modèle linéaire.....	102
3.1. Contraintes de production.....	102
3.2. Contraintes de capacités	103
3.3. Contraintes inhérentes à la solution initiale.....	104
3.3.1. Limitation du nombre de changements d'affectation.....	104
3.3.2. Contraintes relatives au nombre d'agrégats produits alloués à plus d'une usine	105
3.4. Contraintes de gestion de ressources	106

3.4.1.	Contraintes de dimensionnement des ressources	106
3.4.2.	Evaluation du nombre de transferts de ressource entre les usines	107
3.5.	Formulation de la fonction objectif	108
3.6.	Modèle linéaire : formulation générale	109
3.7.	Applications numériques	112
3.7.1.	Exploitation des résultats : illustration	112
3.7.2.	Etude des temps de résolution associés	117
4.	Conclusion.....	119

Liste des figures

Figure 22 : Equilibre charge – capacité de la première instance.....	113
Figure 23 : Satisfaction de la demande périodique dans le cas de la configuration initiale...	114
Figure 24 : Satisfaction de la demande périodique associée à la meilleure solution obtenue par le GRASP.....	115
Figure 25 : Utilisation capacitaire des lignes de production dans le cas de la solution initiale	115
Figure 26 : Utilisation capacitaire des lignes de production dans le cas de la nouvelle solution	115
Figure 27 : Nombre de familles de standardisation différentes fabriquées à chaque période sur la ligne de production 8.....	116

Liste des tableaux

Tableau 3 : Temps associés à la résolution du modèle linéaire dans le cas de la première instance.....	113
Tableau 4 : Comparaison des planifications associées à la configuration initiale ainsi qu'à la nouvelle solution	114
Tableau 5 : Nombre moyen de familles de standardisation différentes fabriquées au sein de chaque ligne de production lors d'une même période.....	116
Tableau 6 : Temps de résolution pour la première instance du modèle linéaire	117
Tableau 7 : Temps d'exécution associés aux différentes solutions.....	118
Tableau 8 : Comparaison des résultats avec les configurations initiales associées	118

1. Introduction

A ce stade de ce manuscrit de thèse, la problématique traitée a été définie tandis que la thématique de recherche associée a été rattachée à celle du Supply Chain Network Design (SCND). De plus, à travers la réalisation d'un état de l'art, permettant de les replacer au sein de la littérature scientifique, nos travaux ont été comparés avec ceux précédemment réalisés. Ainsi, nous avons pu constater que ceux-ci présentent des particularités rendant difficile l'utilisation des modèles et méthodes actuels. Plus précisément, a tout d'abord été constaté le fait que la quasi-totalité des contraintes considérées dans nos travaux sont également adressées au sein de la littérature existante relative au SCND, mais d'une manière disparate. De plus, parmi tous les articles référencés, aucun ne considère réellement la notion de transferts de ressources comme un levier permettant, lors du processus de planification stratégique, de réduire le nombre de ces dernières à acheter et ainsi de diminuer le coût des investissements associés. Partant de ce constat, notre problème a été formulé comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain. Ce processus de contextualisation ayant été réalisé, nous sommes à même, désormais, de nous intéresser au cœur même de nos travaux de recherche ; ceci faisant l'objet de ce chapitre ainsi que du reste du manuscrit de thèse.

La première phase de nos activités de recherche correspond à la modélisation du problème d'affectation stratégique de la production et de dimensionnement des ressources ainsi que de la flexibilité du système de production d'une Supply Chain et, ceci, dans un contexte déterministe. Celle-ci a été décomposée en deux sous-étapes à savoir respectivement la simplification puis modélisation des différentes contraintes industrielles considérées et leur transcription sous la forme d'un problème linéaire à variables mixtes et entières (Mix Integer Linear Programm, MILP) ; ces aspects faisant l'objet de ce troisième chapitre.

Compte tenu de ces éléments, la seconde partie de ce chapitre présente la façon avec laquelle ont été prises en compte les différentes contraintes industrielles précédemment évoquées. Plus précisément, il s'agit d'explicitier la manière avec laquelle certaines d'entre elles ont été simplifiées afin de pouvoir être modélisées. Ces éléments introduits, une formulation mathématique du problème, sous la forme d'un MILP, est présentée lors de la troisième partie tandis que des applications numériques de celui-ci sont introduites au sein de la quatrième. Cette dernière partie, outre l'illustration du modèle linéaire réalisé, a également pour but de mettre en évidence la complexité associée au problème adressé, ceci nous amenant à conclure à l'impossibilité d'utiliser des méthodes exactes afin de résoudre des instances de tailles industrielles. De plus, elle a également pour objectif d'introduire des exemples numériques réutilisés ultérieurement dans le but d'évaluer, par comparaison, la qualité des différentes méthodes de résolutions approchées présentées dans la suite de ce document.

2. Modélisation des contraintes industrielles

Cette partie a pour objectif de présenter la manière avec laquelle ont été appréhendées les différentes contraintes industrielles. Plus précisément, il s'agit d'indiquer dans quelle mesure celles-ci ont été simplifiées afin de pouvoir être modélisées. Cependant avant de s'intéresser spécifiquement à ces dernières, il convient d'introduire la façon dont a été modélisé le système de production dans son ensemble.

2.1. Modélisation du système de production d'une Supply Chain

Conformément aux éléments indiqués lors du premier chapitre, une partie de nos travaux porte sur l'affectation stratégique des productions ainsi que le dimensionnement des ressources et de la flexibilité du système de production d'une Supply Chain. Ce problème consiste à déterminer la meilleure solution en termes d'affectation des productions et de dimensionnement des ressources ; celle-ci pouvant correspondre à une modification de la configuration initiale. Par meilleure solution, nous entendons une solution permettant d'assurer la pérennité long terme du système tandis que des contraintes machines et de ressources sont considérées.

Dans ce cadre, le système de production d'une Supply Chain a été modélisé sous la forme d'usines composées elles-mêmes de diverses lignes de production. Ces dernières correspondent à un ensemble de machines, reliées entre elles, permettant l'établissement d'un flux de production dans le but d'aboutir à la fabrication de produits finis à partir de différents composants semi-finis ainsi que de matières premières à l'état brut. Ces différents éléments ont été adressés dans le cadre d'un horizon stratégique, horizon représenté sous la forme d'un ensemble de périodes. Ainsi, ne sont pas considérés des produits finis mais des regroupements de ces derniers. Plus précisément, les différentes décisions sont prises relativement à un ensemble de périodes pour différents agrégats produits dans le cadre du système de production d'une Supply Chain constitué d'usines elles-mêmes composées de lignes de production. Notons que bien que soit considéré un horizon long terme, sont à la fois prises des décisions d'ordre stratégique et d'ordre tactique. En effet, les secondes permettent d'évaluer la pertinence des premières au niveau moyen terme. Elles constituent donc une caractérisation au niveau tactique des décisions stratégiques. Ces dernières concernent l'affectation des productions aux usines ainsi que le dimensionnement des ressources. Quant à elles, les décisions tactiques correspondent principalement la planification de la production. Ainsi, elles consistent à décider des quantités de chaque agrégat produits à fabriquer au sein de chaque ligne de production lors de chaque période, afin de satisfaire la demande. Notons que cette dernière est considérée comme perdue lorsqu'elle ne peut être satisfaite en temps voulu. Autrement dit, aucun back-order n'est autorisé tandis que des stocks peuvent être constitués afin d'anticiper les productions et lisser la charge. Remarquons que dans ce contexte, alors même que l'horizon considéré est un horizon long terme, les périodes correspondent à des intervalles de temps « tactiques » telle que la maille mensuelle. Ainsi, outre les impacts moyens termes évoqués précédemment, elles permettent la considération de phénomènes particuliers tels que la saisonnalité de la demande et des capacités et, à ce titre, renforcent la fiabilité des décisions stratégiques prises.

Compte tenu de ces différents éléments, un certain nombre de notations ont été définies. Celles-ci, étant utilisées tout au long de ce chapitre, sont introduites au cours de la partie suivante.

2.2. Notations

Les notations introduites et utilisées tout au long de ce document sont de différentes natures. Ainsi, sont distinguées les ensembles, les paramètres ainsi que les variables comme illustré au cours des paragraphes suivants.

2.2.1. Ensembles

Les premières notations à expliciter afin de faciliter l'introduction de toutes les autres correspondent à celles des différents ensembles à savoir :

T	: ensemble des périodes ;
P	: ensemble des agrégats produits ;
$p^{new}, p^{new} \subset P$: ensemble des nouveaux agrégats produits ;
$p^{ma}, p^{ma} \subset P$: ensemble des agrégats produits pouvant être affectés à plus d'une usine ;
FS	: ensemble des familles de standardisation ;
U	: ensemble des usines ;
U_p^{init}	: ensemble des usines auxquelles les éléments de l'agrégat produit p sont initialement alloués ;
U_p	: nouvelle ensemble des usines auxquelles les éléments de l'agrégat produit p sont alloués ;
UF_f	: ensemble des usines au sein desquelles au moins un élément de la famille de standardisation f est fabriqué pendant au moins une période de l'horizon ;
L	: ensemble des lignes de production.

En plus de ces différents éléments, ont également été définis un certain nombre de paramètres représentant des données d'entrée du problème considéré.

2.2.2. Paramètres

Parmi les différents paramètres introduits peuvent être distingués les coûts, les éléments relatifs au système de production ainsi qu'à la demande ou encore ceux permettant de représenter la configuration initiale. Plus précisément, ceux-ci sont constitués de :

$cprod_{p,l}$: coût de fabrication du produit p sur la ligne de production l ;
$pvente_p$: prix de vente d'un élément de type p ;
$d_{p,t}$: demande associée à l'agrégat produit p pour la période t ;
cr_p	: coût d'une ressource dédiée au produit p ;
$nbTR_p^{init}$: nombre total initial de ressources dédiées à l'agrégat produit p ;
$prod_p$: nombre d'éléments de type p fabriqués à l'aide d'une ressource pendant une période ;
$qmin_l$: nombre minimum de ressources à affecter à la ligne de production l pour tout lancement de production ;

$volmin_l$: volume minimal d'éléments à fabriquer à chaque lancement de production sur la ligne de production l ;
$stock_p^{init}$: stocks initiaux relatifs à l'agrégat produit p ;
$cstock$: coût mensuel de stockage ;
pCA	: pénalité associée à un changement d'affectation par rapport à la solution initiale ;
pFS	: pénalité associée à la production d'au moins un élément d'une famille de standardisation au sein d'une usine ;
ctr	: coût de transfert d'une ressource ;
$nbMaxCA$: nombre maximum de changement d'affectation autorisé ;
$nbMA$: nombre maximal de multi-affectations possibles ;
$nbFL_l$: nombre maximal de familles de standardisation différentes pouvant être produites sur la ligne de production l lors d'une même période ;
$pCapa$: perte de capacité associée à la production de deux familles de standardisation différentes sur une même ligne de production ;
$capa_{l,t}$: capacité de la ligne de production l lors de la période t ;
$capab_{p,l}$: paramètre valant 1 si la ligne de production l a la capacité technique de produire le produit p ;
M	: très grand entier.

Ces paramètres sont utilisés au sein des différentes inégalités introduites dans la suite de ce chapitre afin d'affecter des valeurs aux différentes variables ; celles-ci faisant l'objet de la partie suivante.

2.2.3. Variables

Les variables, dont les valeurs sont attribuées par l'intermédiaire des différentes équations introduites dans la suite de ce document, ont pour point commun d'être entières. Cependant, certaines d'entre elles présentent la particularité de ne pouvoir prendre que les valeurs 0 et 1 (variables binaires). Ainsi, sont distinguées respectivement :

Variables entières :

$qte_{p,l,t}$: quantité d'éléments de type p fabriqués sur la ligne de production l lors de la période t ;
$sd_{p,t}$: nombre d'éléments de type p vendus lors de la période t ;
$nbTR_p$: nombre total de ressources dédiées à l'agrégat produit p ;
$nbrU_{p,u,t}$: nombre de ressources dédiées au produit p affectées à l'usine u pendant la période t ;
$stock_{p,t}$: nombre de produits de type p en stock lors de la période t ;
$nbCA$: nombre total de changements d'affectation ;
$nbUsine_f$: nombre total d'usines au sein desquelles un ou plusieurs élément(s) de la famille de standardisation f est fabriqué lors d'au moins une période de l'horizon ;
$nbTr_p$: nombre total de transferts de ressources, dédiées à l'agrégat produit p , réalisé sur l'ensemble de l'horizon ;

$pCapaLProd_{l,t}$: perte de capacité associée à la ligne de production l lors de la période t .

Variables binaires:

- mA_p : variable binaire valant 1 si l'agrégat produit p est affecté à plus d'une usine, 0 sinon ;
- $estPdtFL_{f,l,t}$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille de standardisation f est fabriqué sur la ligne de production l lors de la période t ;
- $estPdtFU_{f,u}$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille de standardisation f est fabriqué au sein de l'usine u lors d'au moins une période de l'horizon T ;
- CA_p : variable binaire valant 1 si le produit p a subi au moins un changement d'affectation par rapport à la configuration initiale.

Notons que dans le reste de ce document, et ceci afin de simplifier les notations précédemment introduites, sera utilisée la simplification mathématique $l \in u$ où $u \in U$ afin de désigner les lignes de productions appartenant à l'usine u . De la même façon, $p \in f$ où $f \in FS$ correspondra aux différents agrégats produits composant la famille de standardisation f . De plus, $|X|$ où X est un ensemble quelconque, représentera le nombre d'éléments de ce dernier, c'est-à-dire à son cardinal. Ces précisions faites, il convient désormais de s'intéresser à la manière avec laquelle ont été modélisées les différentes contraintes, à commencer par celles relatives à la gestion des ressources.

2.3. Modélisation des contraintes de ressources

Conformément aux éléments indiqués lors du premier chapitre, afin de fonctionner, chaque ligne de production se doit de disposer d'un nombre suffisant de ressources. Ces dernières sont spécifiques à chaque à chaque agrégat produit. Autrement, dit à chaque agrégat produit correspond un type de ressources ; dont le nombre total reste invariant tout au long de l'horizon considéré. A titre illustratif, dans le cadre de la Supply Chain Michelin, les ressources correspondent aux moules, ces derniers étant spécifiques à chaque agrégat produit.

Notons que dans le cadre de nos travaux, une fois dimensionné le nombre de ressources reste invariant tout au long de l'horizon considéré. Par contre celles-ci font l'objet d'une répartition périodique, en fonction des quantités produites, entre les différentes usines. Cependant, ce dimensionnement est soumis à diverses contraintes spécifiques comme indiqué au sein de la partie suivante.

2.3.1. Les contraintes de dimensionnement

La répartition périodique des ressources entre les différentes usines afin de permettre la production des quantités planifiées est soumise à plusieurs contraintes à commencer par celle relative à la notion de quantité minimum, associée à toute ligne de production. Celle-ci traduit le nombre de ressources dont chacune d'elles doit disposer afin de réaliser tout lancement de fabrication et, ceci, indépendamment des quantités produites. Elle est à rapprocher de la notion de productivité c'est-à-dire du nombre d'éléments pouvant être fabriqué à l'aide d'une ressource

sur un certain horizon de temps. Ainsi, pour une période t , le nombre $nbr_{p,l,t}$ de ressources dédiées à un agrégat produit p , à allouer à une ligne de production l pour la fabrication d'une quantité $qte_{p,l,t}$ est donné par la formule:

$$nbr_{p,l,t} = \max\left(\frac{qte_{p,l,t}}{prod_p}, qtmin_l\right) \quad (1)$$

$nbr_{p,l,t}$ correspond donc au maximum entre le nombre de ressources minimum associé à la ligne de production l et celui nécessaire à l'absorption du volume mis en fabrication. Notons que cette valeur est propre à chaque triplet (agrégat produit, ligne de production, période). Ainsi, théoriquement, le nombre total de ressources à installer au sein d'une usine u lors d'une période t correspond à la somme des $nbr_{p,l,t}$, des différentes lignes de production l la composant et réalisant au moins un élément de l'agrégat produit p considéré, c'est-à-dire :

$$\sum_{l \in u, qte_{p,l,t} > 0} nbr_{p,l,t} \quad (2)$$

Dans le cadre de nos travaux de recherche, cette contrainte a été légèrement simplifiée puisque le dimensionnement des ressources a été réalisé à la maille usine et non ligne de production. Ainsi, le nombre $nbrU_{p,u,t}$ de ressources, spécifiques à un agrégat produit p à allouer à une usine u lors d'une période t , correspond, non pas, à la somme de celles installées en t sur les différentes lignes de production la composant mais à la valeur maximum entre le plus grand nombre de ressources minimum de ces dernières et la quantité nécessaire à la production de l'intégralité du volume affecté. Mathématiquement, cette valeur peut être représentée par l'intermédiaire de l'équation suivante reprenant les notations introduites précédemment:

$$nbrU_{p,u,t} = \max\left(\frac{\sum_{l \in u} qte_{p,l,t}}{prod_p}; \max_{l, qte_{p,l,t} > 0} (qtmin_l)\right) \quad (3)$$

Notons, que la réalisation du dimensionnement des ressources au niveau de l'usine correspond au fait que la planification soit effectuée à la maille mois et non à une autre plus fine. En effet, dans ce contexte, la fabrication sur différentes lignes de production d'un même agrégat produit, lors d'une même période, ne sera pas réalisée simultanément mais étalée dans le mois. Par conséquent, ce seront les mêmes ressources qui seront utilisées ; celles-ci étant transférées entre les lignes de production au sein de cette même usine. Notons d'ailleurs que, dans les faits, les planifications obtenues pourront être modifiées afin de regrouper, dans une certaine mesure, la fabrication d'un même agrégat produit sur une unique ligne de production sans pour autant affecter la valeur de la fonction objectif. Compte tenu de ces différents éléments, il apparaît donc opportun de dimensionner les ressources nécessaires à la maille usine, par la prise en compte, d'une part, des quantités nécessaires à la production du volume lié à l'agrégat produit considéré et, d'autre part, du maximum des quantités minimum à affecter aux lignes de production devant fabriquer ce même agrégat produit lors de la période considérée.

Il convient également de remarquer que cette démarche de simplification est conforme avec la manière avec laquelle sont comptabilisés les transferts de ressources à savoir à la maille usine et non ligne de production.

2.3.2. Evaluation du nombre de transferts de ressources

A l'inverse de la définition des quantités à produire, les transferts de ressources sont à considérer entre les usines uniquement et non entre les lignes de production situées au sein de ces dernières. Plus précisément, comme indiqué au début de cette partie, à chaque agrégat produit est associé un ensemble de ressources partagées à chaque période, en fonction des quantités à produire et des contraintes de nombre minimum de ressources associées aux lignes de production, entre les différentes usines. Par conséquent, le nombre affecté à ces dernières variera au cours de l'horizon de temps, variation résultante en autant de transferts présentant un surcoût opérationnel devant être considéré. Ainsi, le nombre total $nbTr_p$ des transferts réalisés relativement à un agrégat produit p sur un horizon de $|T|$ périodes au sein d'un réseau constitué d'un ensemble de $|U|$ usines peut être formulé de la façon suivante où $|X|^+ = \begin{cases} X & \text{si } X > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$:

$$nbTr_p = \sum_{t=2}^T \sum_{u=1}^U |nbrU_{p,u,t} - nbrU_{p,u,t-1}|^+ \quad (4)$$

Cette équation introduite, il convient de préciser qu'elle suppose que le nombre total de ressources associées à chaque agrégat produit soit constant tout au long de l'horizon T , ce qui est le cas ici. En effet, cette comptabilisation est uniquement valide dans le cas où toute augmentation du nombre de ressources allouées à une usine correspond à une diminution au sein d'une autre. Notons également que, bien entendu, ces notions de transferts ne sont pas pertinentes pour les agrégats produits mono-affectés puisque dans ce cas les ressources seront toujours allouées à une même et unique usine.

Au sein du paragraphe précédent, a été mentionné le fait que le nombre de ressources associés à chaque usine était considéré comme constant au cours de l'horizon de planification. Bien que cette hypothèse soit relativement forte, elle n'interdit pas le dimensionnement de ces dernières, ce processus ayant lieu en cas de modification de la solution initiale, comme indiqué au sein de la partie suivante.

2.4. Prise en compte d'une solution initiale

Comme indiqué lors des deux premiers chapitres, l'une des particularités de nos travaux est de considérer la notion de solution initiale correspondante à une affectation de la production ainsi qu'un dimensionnement de la flexibilité existant. Une telle prise en compte engendre un certain nombre de contraintes quant à la génération de nouvelles solutions, à commencer par celles portant sur le nombre limite de modifications pouvant être réalisées.

2.4.1. Limitation du nombre de modifications pouvant être apportées à la solution initiale

La génération de solutions à partir de la configuration initiale est soumise au respect d'un nombre maximum de changements d'affectations possible. En effet, l'ampleur de ces modifications ne peut excéder certaines limites afin de ne pas aboutir à des solutions entraînant des investissements trop conséquents et désorganisant d'une manière trop importante la Supply Chain et, ce, alors même qu'elle améliorerait sa rentabilité sur le long terme. Ainsi, le nombre de changements d'affectation est contraint par une valeur limite $nbMaxCA$ constituant une donnée d'entrée du problème. Celle-ci correspond au nombre maximum d'agrégats produits pouvant faire l'objet d'une ou plusieurs modifications d'affectations vis-à-vis de la solution initiale. Cependant, afin qu'un élément soit considéré de la sorte, il faut qu'il subisse un changement

d'affectation entraînant sa production au sein d'une usine à laquelle il n'était pas alloué initialement. Ainsi, le simple fait de réduire le nombre d'usines auxquelles un agrégat produit est affecté, sans en introduire de nouvelles, n'est pas considéré comme un changement d'affectation à proprement parlé. En effet, une telle modification ne nécessitera pas la réalisation d'investissements spécifiques pour l'adaptation de différents moyens de production afin de permettre sa fabrication. Compte tenu de ces éléments, la limitation sur le nombre de changements d'affectations peut être représentée par l'intermédiaire des équations suivantes :

$$CA_p = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists u \in U, u \in U_p \text{ et pas à } U_p^{init} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5)$$

$$nbCA = \sum_p CA_p \quad (6)$$

$$nbCA \leq nbMaxCA \quad (7)$$

Bien entendu, afin que ces différentes équations s'avèrent pertinentes, il convient d'en introduire une autre permettant de représenter le fait qu'un agrégat produit soit, ou non, affecter à une usine. Autrement dit, il apparaît nécessaire d'interdire la production d'un élément donné p , sur toutes les lignes de productions appartenant à des usines auxquelles il n'est pas affectés (i.e $u \in U \setminus U_p$); ceci prenant la forme de l'équation suivante :

$$\sum_{l \in u} \sum_T qte_{p,l,t} \leq 0, \forall p \in P, \forall u \in U \setminus U_p \quad (8)$$

En plus de ces éléments, un autre paramètre doit être considéré dans le cadre de la génération de solutions à partir de la configuration initiale. Comme indiqué lors du premier chapitre, celui-ci concerne le nombre d'agrégats produits affectés à plusieurs usines.

2.4.2. Nombre limite d'agrégats multi-affectés

Parmi les différents leviers de flexibilité considérés dans le cadre de ce document, se trouve la mix flexibilité. Conformément au premier chapitre, celle-ci correspond à l'affectation d'un même produit à plusieurs usines dans le but d'ajuster la charge à la capacité du système en cas de déséquilibre. Cependant, une telle multi-affectation entraînant des coûts de gestion supplémentaires, leur nombre total est limité ; limitation dont il convient de tenir compte lors de la génération de solutions. Notons que cet aspect est conforme avec la non-pénalisation des réductions d'affectations n'impliquant pas la production d'un agrégat produit au sein d'une usine à laquelle il n'était initialement pas affecté. Ainsi, cette limitation peut être représentée par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$mA_p = \begin{cases} 1 & \text{si } |U_p| > 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_p mA_p \leq nbMA \quad (10)$$

Notons, que pour des raisons économiques et de bonne gestion, seuls certains agrégats produits peuvent faire l'objet d'une multi-affectation, ces derniers correspondants à l'ensemble P^{ma} . Ainsi, afin d'interdire l'affectation à plusieurs usines des produits n'appartenant pas à ce dernier, il convient d'introduire une contrainte spécifique, à savoir :

$$mA_p = 0, \forall p \in P \setminus P^{ma} \quad (11)$$

Outre les aspects liés à l'affectation des productions, la configuration initiale est également constituée d'un dimensionnement des ressources associées à chaque agrégat produit. Or, dans le cadre d'une modification d'affectation, il se peut que celui-ci devienne inadapté, notamment de par les valeurs différentes, entre les lignes de production, du nombre minimal à installer pour toute mise en fabrication. Par conséquent, il convient de permettre la modification de ce nombre total de ressources associées à chaque agrégat produit.

2.4.3. Modification du dimensionnement des ressources initial

De par les modifications apportées à la configuration de départ, le dimensionnement initial des ressources peut devenir inopportun. Ainsi, dans le cadre de la génération de nouvelles solutions, à tout changement d'affectation agrégat produit/usine est associé un redimensionnement du nombre de ressources correspondantes et, ceci, afin d'un définir un en adéquation avec les changements d'affectation réalisés. Contrairement à celui relatif à la répartition périodique des ressources entre les différentes usines décrit lors de la partie précédente, ce processus de redimensionnement respecte strictement les contraintes de nombre minimum de ressources à affecter à chaque ligne de production. Plus précisément, pour un agrégat produit donné, faisant l'objet d'une modification d'affectation, le nombre de ressources doit être le plus petit permettant de satisfaire à chaque période l'intégralité des contraintes relatives à leur gestion. Ainsi, celui-ci correspond au nombre maximal, pris sur l'ensemble des périodes de l'horizon, de la quantité de ressources nécessaire à la satisfaction des quantités à produire et des contraintes de nombre minimum propre aux lignes de production ; ce qui en reprenant les différentes notations précédemment utilisées peut être formulé par l'intermédiaire de l'équation suivante :

$$nbTR_p = \max_{t \in T} (\sum_{L, qte_{p,l,t} > 0} \max(\frac{qte_{p,l,t}}{prod_p}, qtmin_l)) \quad (12)$$

où $nbTR_p$ correspond au nombre total de ressources associées à un agrégat produit p ayant fait l'objet d'un changement d'affectation. Notons que, contrairement au nombre d'agrégats produits affectés à plus d'une usine, la quantité totale de ressources à acquérir n'est pas limitée. En effet, dans ce cas l'investissement associé est plus facile à estimer car correspondant directement au coût d'achat si bien que sa pénalisation peut être directement réalisée par l'intermédiaire de la fonction objectif.

Au cours des précédentes parties, aucune distinction n'a été réalisée entre les différents agrégats produits. Cependant, il convient de dissocier ceux ayant déjà été mis en production de ceux n'ayant pas encore été lancés commercialement ; ces derniers faisant l'objet de contraintes spécifiques.

2.4.4. Contraintes relatives à la gestion des nouveaux agrégats produits

Un autre élément important, relatif à la notion de solution initiale, concerne les nouveaux agrégats produits. En effet, pour ces derniers, l'affectation proposée dans la solution initiale correspond uniquement à des décisions anticipées et non à de quelconques investissements déjà mis en œuvre. A ceci s'ajoute le fait que pour ceux-ci tandis aucun dimensionnement de ressources n'a été effectivement réalisé. Par conséquent, lors du processus de génération d'une solution alternative, il convient de ne pas pénaliser les éventuels changements d'affectation dont pourrait faire l'objet ces éléments par rapport à la configuration initiale. En effet, que cette

dernière soit conservée ou non, il sera nécessaire de réaliser des investissements afin de permettre leur fabrication; aucune usine n'étant préalablement adaptée pour. Ainsi, l'équation (5) permettant de comptabiliser le nombre effectif de changements d'affectation doit être réécrite de la façon suivante :

$$CA_p = \begin{cases} 1 & \text{si } p \in P \setminus P^{new} \text{ et } \exists u \in U, u \in U_p \text{ et pas à } U_p^{init} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (13)$$

A l'inverse, le fait d'affecter de tels agrégats produits à plusieurs usines doit quant à lui être considéré et, ceci, au même titre que ceux portant sur des éléments plus anciens, compte tenu du surcoût engendré vis-à-vis d'une mono-affectation. Remarquons également que, son affectation initiale soit ou non modifiée, le nombre de ressources associés à un nouvel élément devra faire l'objet d'un dimensionnement et, ceci, selon le processus décrit par l'équation (12) introduite précédemment. Afin de mieux appréhender ces différents paramètres, il convient de revenir sur la définition exacte de « nouvel agrégat produit ». En effet, ceci ne correspond pas à tous les éléments jamais encore fabriqués mais à ceux pour lesquels aucun investissement n'a encore été effectivement mis en œuvre. Autrement dit, un agrégat produit jamais encore mis en fabrication mais pour lequel des investissements ont été réalisés afin de permettre sa production au sein d'une ou plusieurs usines, ne sera pas considéré comme nouveau et sera concerné, au même titre que les autres, par l'ensemble des restrictions portant sur les modifications de la configuration initiale précédemment évoquées.

Jusqu'à maintenant ont été considérées, au regard de la solution initiale, des contraintes, telles que l'affectation des agrégats produits et le dimensionnement des ressources, relatives au dimensionnement de la Supply Chain. Il convient donc maintenant de s'intéresser à d'autres relatives à la planification de la production telles que celles liées à la répartition périodique des ressources, évoquées précédemment, ou encore celles associées à la notion de standardisation faisant l'objet de la partie suivante.

2.5. Standardisation : temps de changements de dimension et flexibilité des lignes de production

Conformément aux éléments indiqués lors des deux premiers chapitres, différents paramètres liés à la notion de standardisation sont considérés dans le cadre de nos travaux de recherche. Plus précisément, les agrégats produits ont été regroupés, en fonction du partage de composants communs, au sein de différentes familles de standardisation. Ceci traduit le fait que de par leurs similarités techniques, la fabrication de certains agrégats produits sur une même ligne de production ne requière pas d'adaptations trop conséquentes des machines. Autrement dit, ceci signifie, qu'à l'inverse, toute fabrication sur une même ligne de production d'éléments appartenant à différentes familles de standardisation nécessite des opérations de manutention se traduisant par des pertes de capacités. Afin de tenir compte de cet aspect et du niveau de flexibilité des différents moyens de fabrication, a été associé à chaque ligne de production $l \in L$ un nombre maximal $nbFL_l$ de familles de standardisation différentes pouvant être fabriquées lors d'une même période. Ceci traduit leur niveau de flexibilité, c'est-à-dire la facilité avec laquelle il est possible de passer de la production d'un élément à un autre techniquement différent. Cet aspect se représente, pour une ligne de production l lors d'une période t , simplement par l'intermédiaire des deux équations suivantes :

$$estPdtFL_{f,l,t} = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists p \in f, qte_{p,l,t} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$$

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} \leq nbFL_l \quad (15)$$

De plus, comme indiqué dans le premier chapitre, en plus de ces bornes maximales traduisant le niveau de flexibilité des lignes de production, nos travaux de recherche ont également pour particularité de considérer directement la notion de perte de capacité liée à la diversité des agrégats produits fabriqués sur un même moyen de fabrication. Cet aspect a été modélisé par le biais d'une diminution de la capacité périodique de chacune des lignes de production en fonction du nombre de familles de standardisations différentes fabriquées lors de la période considérée. Ainsi, a été introduit un paramètre « *pCapa* » traduisant la perte de capacité moyenne périodique provenant de l'immobilisation des machines suite au passage de la production d'agrégats produits d'une famille de standardisation donnée à des éléments appartenant à une autre. Bien entendu, cette valeur constitue une approximation de la perte réelle de capacité ; la présence de différentes familles de standardisation n'entraînant pas toujours des durées périodiques d'immobilisation des machines identiques selon la planification de la production (les éléments d'une même famille de standardisation ne font pas toujours l'objet du même nombre de lancements de production périodique). Cependant, à un horizon stratégique, une telle approximation demeure pertinente afin de tenir compte des impacts liés à la diversité des éléments fabriqués. Afin de compléter cette explication, il convient de préciser que les capacités correspondent ici à un nombre de produits finis pouvant être réalisés lors de la période considérée. Autrement dit, aucune différenciation, en termes de temps de production, n'est effectuée entre les différents agrégats produits, ce qui, à un horizon stratégique, constitue une approximation relativement pertinente. Dans ce contexte, cette contrainte peut être représentée, pour une ligne de production l lors d'une période t , sous la forme :

$$pCapaLProd_{l,t} = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_l estPdtFL_{f,l,t} \leq 1 \\ (\sum_l estPdtFL_{f,l,t} - 1) \times pCapa & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$$

Notons que cette équation traduit le fait que, bien entendu, aucune perte de capacité n'est considérée lorsqu'une unique famille de standardisation est fabriquée sur la ligne de production en question lors de la période considérée puisqu'alors aucune modification conséquente, conduisant à leur arrêt, ne doit être apportée aux machines.

L'introduction de cette notion de perte de capacités en fonction du nombre de familles de standardisation différentes fabriquées sur une même ligne de production présente l'avantage de tenir compte directement de l'impact lié à l'affectation ainsi qu'à la planification périodique des productions. Ainsi, à l'inverse des bornes maximales sur le nombre maximal de familles de standardisations différentes pouvant être fabriquées lors d'une même période, elle ne constitue pas une donnée intrinsèque à chaque ligne de production. Ces deux éléments ne sont pas les seuls relatifs à la notion de standardisation à avoir été considérés, d'autres paramètres ayant été intégrés au sein de la fonction objectif comme indiqué dans la partie suivante.

2.6. Fonction objectif : maximisation du profit

Au cours des parties précédentes, a été évoquée la façon avec laquelle ont été considérées et modélisées certaines contraintes spécifiques. Remarquons d'ailleurs que seules celles présentant une particularité ont été abordées. En effet, d'autres telles que la capacité des lignes de production n'ayant pas prêté à une quelconque interprétation ne nécessitent pas l'introduction d'une partie spécifique. Ces différents éléments constituent une part seulement de la modélisation du problème considéré, l'autre correspondante à la fonction objectif. Celle-ci a été définie de manière à répondre à une logique industrielle long terme, c'est-à-dire trouver le dimensionnement permettant de satisfaire le plus possible la demande sans pour autant entraîner des surcoûts trop

importants risquant de mettre à mal la pérennité du système. Cet aspect correspond à la notion de profit pouvant être défini comme la différence entre le chiffre d'affaire issu des ventes et les différents coûts. L'estimation de ces derniers constitue l'une des principales difficultés d'une telle approche. Ainsi, dans notre cas ont été considérés ceux relatifs au dimensionnement ainsi que d'autres correspondants à l'aspect opérationnel. En effet, la prise en compte de ces différents types de coûts est relativement importante puisque le fait de considérer uniquement ceux relatifs au dimensionnement peut conduire à l'obtention de configurations de la Supply Chain présentant des coûts de fonctionnement opérationnels très élevés et non profitables.

Précisons, qu'en réalité, les éléments introduits au sein de la fonction objectif ne sont pas tous des coûts à proprement parlé, certains éléments correspondants d'avantage à des pénalités. En effet, il s'avère parfois ardu d'estimer le coût réel d'une opération. Par exemple, les investissements engendrés par les changements d'affectations sont relativement difficiles à évaluer précisément si bien qu'à ceux-ci a été associée une pénalité permettant de traduire, à la fois, les investissements nécessaires à la mise en production d'un agrégat au sein d'une nouvelle usine et la perturbation engendrée au sein de la Supply Chain. Remarquons que, bien que le nombre de changements d'affectation de production soit limité, celui-ci est tout de même considéré au sein de la fonction objectif afin de discriminer les solutions entre elles. Ainsi, la limitation du nombre de changements d'affectation pouvant être réalisés (inéquation (7)) peut être considéré comme une contrainte de coupe permettant de réduire l'espace de recherche en interdisant l'obtention de solutions trop coûteuses qui ne seraient pas mises en œuvre quel que soit le profit généré et ceci pour des raisons de budget disponible. Cet élément ne constitue pas le seul paramètre long terme à être considéré au sein de la fonction objectif. Ainsi, a également été intégré l'investissement nécessaire à l'achat des ressources ; leur nombre étant constant sur l'intégralité de l'horizon.

Concernant l'aspect opérationnel, différents coûts ont été considérés, à savoir ceux inhérents à la fabrication des agrégats produits sur les différentes lignes de production, ceux relatifs aux stocks ainsi que ceux associés aux transferts des ressources. De plus a également été introduite une pénalité relative à la dispersion de la fabrication des éléments appartenant à une même famille de standardisation et, ceci, sur l'ensemble de l'horizon de planification. Cet aspect correspond à la volonté de renforcer la prise en compte de la standardisation par la favorisation des solutions minimisant l'éclatement de la production des agrégats produits partageant des composants communs.

Ces différents éléments relevant de décisions stratégiques ou opérationnelles, correspondent tous à des coûts ou pénalités. Afin d'introduire la notion de profit, ceux-ci ont été retranchés au chiffre d'affaire issu des ventes ; le but étant alors de maximiser la fonction objectif résultante. Cette dernière peut ainsi être exprimée par le biais des équations (17-20).

$$\text{Max : } CA - CC - CO \quad (17)$$

$$CA = \sum_P \sum_T sd_{p,t} \times pvente_p \quad (18)$$

$$CC = \sum_P cr_p \times nbTR_p + pCA \times nbCA \quad (19)$$

$$CS = \sum_P (ctr \times nbTr_p + \sum_T (cstock \times stock_{p,t} + \sum_L qte_{p,l,t} \times cprod_{p,l})) + pFS \times \sum_{FS} nbUsine_f \quad (20)$$

Avec :

- CA : chiffre d'affaire ;

- CC : coûts liés à la construction du système de production de la Supply Chain ;
- CO : coûts opérationnels.

Maintenant que la majorité des contraintes ainsi que la fonction objectif ont été introduites, il convient de donner une formalisation mathématique du problème dans son ensemble; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

2.7. Formalisation mathématique

Les différents éléments précédemment introduits permettent de modéliser le problème considéré dans son ensemble. Cependant, à ceux-ci doivent être ajoutées des contraintes portant sur la satisfaction de la demande, la capacité des lignes de production ainsi que l'équilibre des stocks ; ces dernières étant introduites au sein de la formalisation générale du problème donnée ci-dessous.

$$\text{Max : } CA - CC - CO \quad (21)$$

$$CA = \sum_P \sum_T sd_{p,t} \times pvente_p \quad (22)$$

$$CC = \sum_P cr_p \times nbTR_p + pCA \times nbCA \quad (23)$$

$$CS = \sum_P (ctr \times nbTR_p + \sum_T (cstock \times stock_{p,t} + \sum_L qte_{p,l,t} \times cprod_{p,l})) + pFS \times \sum_{FS} nbUsine_f \quad (24)$$

s.t.

$$stock_p^{init} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_{p,t} + stock_{p,1}, \forall p \in P, \forall l \in L \quad (25)$$

$$stock_{p,t-1} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_{p,t} + stock_{p,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t, t > 1 \quad (26)$$

$$sd_{p,t} \leq d_{p,t}, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (27)$$

$$qte_{p,l,t} \geq volmin_l, \forall l \in L, \forall t \in T, \forall p \in P, qte_{p,l,t} > 0 \quad (28)$$

$$estPdtFL_{f,l,t} = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists p \in f, qte_{p,l,t} > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \forall f \in FS, l \in L, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} \leq nbFL_l, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (30)$$

$$pCapaLProd_{l,t} = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_l estPdtFL_{f,l,t} \leq 1 \\ (\sum_l estPdtFL_{f,l,t} - 1) \times pCapa & \text{sinon} \end{cases} \forall l \in L, \forall t \in T \quad (31)$$

$$\sum_P qte_{p,l,t} \leq capa_{l,t} - pCapaLProd_{l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (32)$$

$$\sum_T qte_{p,l,t} \leq M \times capab_{p,l}, \forall l \in L, \forall p \in P \quad (33)$$

$$\sum_{l \in U} \sum_T qte_{p,l,t} \leq 0, \forall p \in P, \forall u \in U \setminus U_p \quad (34)$$

$$nbTR_p = \max_{t \in T} (\sum_{L, qte_{p,l,t} > 0} \max(\frac{qte_{p,l,t}}{prod_p}, qtmin_l)), \forall p \in P^{new} \quad (35)$$

$$nbTR_p = \max_{t \in T} (\sum_{l, qte_{p,l,t} > 0} \max(\frac{qte_{p,l,t}}{prod_p}, qtmin_l)), \forall p \in P \setminus P^{new}, \sum_U CAU_{p,u} > 0 \quad (36)$$

$$nbTR_p = nbTR_p^{init}, \forall p \in P \setminus P^{new}, \sum_U CAU_{p,u} = 0 \quad (37)$$

$$nbrU_{p,u,t} \geq \max\left(\frac{\sum_{l \in u} qte_{p,l,t}}{prod_p}; \max_{l, qte_{p,l,t} > 0} (qtmin_l)\right), \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (38)$$

$$\sum_U nbrU_{p,u,t} = nbTR_p, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (39)$$

$$nbTr_p = \sum_{t=2}^T \sum_{u=1}^U |nbrU_{p,u,t} - nbrU_{p,u,t-1}|^+, \forall p \in P \quad (40)$$

$$mA_p = \begin{cases} 1 & \text{si } |U_p| > 1 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}, \forall p \in P \quad (41)$$

$$\sum_P mA_p \leq nbMA \quad (42)$$

$$mA_p = 0, \forall p \in P \setminus P^{ma} \quad (43)$$

$$CA_p = \begin{cases} 1 & \text{si } p \in P \setminus P^{new} \text{ et } \exists u \in U, u \in U_p \text{ et pas à } U_p^{init} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (44)$$

$$nbCA = \sum_P CA_p \quad (45)$$

$$nbCA \leq nbMaxCA \quad (46)$$

$$nbUsine_f = |UF_f|, \forall f \in FS \quad (47)$$

$$UF_f = \{u \in U, \sum_{l \in u} \sum_t qte_{p,l,t} > 0\}, \forall f \in FS \quad (48)$$

$$u \in U_p \text{ssi } \sum_T \sum_{l \in u} qte_{p,l,t} \geq 1, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (49)$$

$$(qte_{p,l,t}, sd_p, nbRT_p, nbrU_{p,u,t}, stock_{p,t}, nbCA, nbUsine_f, nbTr_p, nbFL_l \quad (50)$$

$$, pCapaLProd_{l,t}) \in N^{10}$$

$$(estPdtFL_{f,l,t}, mA_p, CAU_{p,u}, estPdtFU_{f,u}) \in \{0, 1\}^4 \quad (51)$$

Conformément aux éléments indiqués précédemment, les équations (21-24) constituent une formalisation de la fonction objectif tandis que les suivantes modélisent différentes contraintes. Ainsi, les égalités (25-26) représentent l'équilibre des stocks, la première étant dédiée au début de l'horizon. En ce qui concerne l'équation (27), celle-ci représente le fait que les quantités vendues lors d'une période ne peuvent excéder la demande correspondante, tandis que (28) impose le respect des quantités minimum à produire de chaque ligne de production. Comme explicité précédemment, les équations (29) et (30) modélisent les contraintes de flexibilité des lignes de production tandis que les deux suivantes (31-32) représentent les pertes de capacités associées à la production de familles de standardisation différentes sur une même ligne de production lors d'une même période. Les inégalités (33) et (34) correspondent, à l'inverse, à des restrictions relatives aux lieux de production des différents agrégats produit. Ainsi, la première impose le respect des contraintes de capacité technique des lignes de production tandis que la seconde interdit la fabrication d'un élément au sein d'une usine à laquelle il n'est pas alloué.

Les cinq inéquations suivantes (35-39), quant à elles, modélisent le processus de dimensionnement et d'affectation aux usines des ressources. Plus précisément, les égalités (35) et

(36) permettent le calcul du nombre total de ressources pour, respectivement, les nouveaux agrégats produits et ceux ayant faits l'objet d'un changement d'affectation et, ceci, conformément aux éléments indiqués lors des parties 2.3 et 2.4 de ce chapitre. À l'inverse, l'équation (37) modélise le dimensionnement des ressources pour les autres agrégats produits, c'est-à-dire ceux n'ayant pas fait l'objet de changements d'affectation, par rapport à la solution initiale, et n'étant pas nouveaux. Ce dimensionnement total du nombre de ressources, spécifiques à chaque agrégat produit, réalisé ; les équations (38) et (39) ont pour objectif de les répartir entre les différentes usines lors de chaque période. Ainsi, cette dernière impose que pour chaque agrégat produit la quantité de ressources soit identique tout au long de l'horizon et, plus précisément, égale à la valeur déterminée précédemment. La première, quant à elle, assure qu'au sein de chaque usine, le nombre de ressources installées permette de satisfaire les quantités à produire ainsi que les contraintes relatives aux différentes lignes de production. Remarquons que, contrairement à l'équation initiale (3), celle-ci n'est plus une égalité mais une inégalité. En effet, de par le fait que le nombre total de ressources dédiées à chaque agrégat produit soit constant tout au long de l'horizon, il se peut qu'à certaine période la totalité de ces dernières ne soit pas utilisée. Par conséquent, afin de ne pas aboutir à des solutions irréalisables, il convient de permettre l'installation, au sein des usines lors des différentes périodes, d'un nombre de ressources supérieur à la quantité réellement nécessaire. Notons également, que conformément aux éléments indiqués dans les parties 2.1 et 2.3 de ce chapitre, cette inéquation s'avère moins restrictive que les inégalités (35) et (36) relatives aux nouveaux produits ainsi qu'à ceux ayant fait l'objet d'un changement d'affectation. Toujours dans le cadre de la gestion des ressources, l'équation suivante (40) permet la comptabilisation du nombre de transferts réalisés tout au long de l'horizon.

En plus des différentes équations précédentes relatives principalement à la production des agrégats produits, les équations (41-43), quant à elles, permettent de comptabiliser et restreindre le nombre de multi-affectations tandis que les trois suivantes (44-46) portent sur les changements d'affectation.

Toutes les inégalités référencées dans cette partie font appel à différents ensemble devant être définis. Ceci est le propre des équations (47-49). Ainsi, l'égalité (48) traduit, pour chaque famille de standardisation f , la nature de l'ensemble UF_f correspondant aux usines au sein desquelles au moins un des éléments la composant est fabriqué lors d'au moins une période de l'horizon T . Celui-ci est réutilisé afin de renseigner la variable $nbUsine_f$ (équation 47), correspondante pour chaque famille f , au nombre d'usines ayant fabriquées lors d'au moins une période un des agrégats produit la constituant. D'une manière similaire, l'inéquation (49) traduit le fait, que pour chaque agrégat produit p , l'ensemble U_p correspond à l'ensemble des usines auxquelles au moins un élément de type p est affecté ; celui-ci étant réutilisé au sein des contraintes (41) et (44). Les deux dernières inégalités, quant à elles, imposent respectivement la positivité et l'intégrité des différentes variables.

Bien que valide et permettant de définir précisément, le problème adressé, cette formalisation mathématique n'a pu être utilisée en l'état afin de résoudre de quelconques instances de notre problème d'Affectation Stratégique des productions et de Dimensionnement des ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain. Ainsi, celui-ci a été linéarisé dans le but de pouvoir être résolu à l'aide de solveurs tels que Cplex.

3. Modèle linéaire

Les formulation des différentes contraintes ainsi que de la fonction objectif ont été linéarisées ; le but étant de pouvoir les utiliser afin de résoudre des instances du problème associé à l'aide de solveurs. Afin de présenter le MILP résultant, l'intégralité des notations précédemment introduites a été conservée. Cependant, un certain nombre de paramètres supplémentaires, notamment des variables binaires, ont été introduits ; ceux-ci étant définis au sein des parties suivantes dédiées chacune à des contraintes spécifiques.

3.1. Contraintes de production

Conformément au modèle (21-51), un nombre relativement important de contraintes portent sur des restrictions relatives à la production des agrégats produits. Les première d'entre elles, correspondantes à la satisfaction de la demande (27), à l'équilibre des stocks (25-26), ainsi qu'aux contraintes techniques (33) n'ont pas fait l'objet d'une quelconque modification et, par conséquent, se formulent d'une manière identique par l'intermédiaire des inégalités (52-55).

$$sd_{p,t} \leq d_{p,t}, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (52)$$

$$stock_p^{init} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_p + stock_{p,1}, \forall p \in P, \forall l \in L \quad (53)$$

$$stock_{p,t-1} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_p + stock_{p,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t, t > 1 \quad (54)$$

$$\sum_T qte_{p,l,t} \leq M \times capab_{p,l}, \forall l \in L, \forall p \in P \quad (55)$$

A l'inverse, la contrainte (34) interdisant la fabrication d'un agrégat produit au sein d'une usine à laquelle il n'est pas affecté a nécessité certaines adaptations. Ainsi, afin de représenter les ensembles U_p^{init} et U_p un paramètre ainsi qu'une variable binaire ont été introduits. Plus précisément, a été défini, pour chaque couple (agrégat produit, usine) l'élément $allocation_{p,u}^{init}$ valant 1 dans le cas où l'agrégat produit p est initialement affecté à l'usine u , ainsi que la variable $allocation_{p,u}$ prenant la valeur 1 dans le cas où l'élément p est, au sein de la nouvelle solution, alloué à l'usine u . Ainsi, tout comme précédemment, ces deux nouvelles notations se réfèrent respectivement à la configuration initiale ainsi qu'à la nouvelle. Partant de leur introduction, la contrainte (34) se réécrit ainsi sous la forme linéaire donnée par l'équation (56).

$$\sum_{l \in U} \sum_T qte_{p,l,t} \leq M \times allocation_{p,u}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (56)$$

Notons qu'en réalité, cette dernière ne fait pas intervenir le paramètre $allocation_{p,u}^{init}$; celui-ci étant utilisé par la suite afin de comptabiliser les changements d'affectation vis-à-vis de la solution initiale. La contrainte de respect des affectations des agrégats produits, n'est pas la seule relative à l'aspect production à avoir dû être reformulée. En effet, celle associée aux quantités minimums à produire (28) a également dû faire l'objet d'une linéarisation. Ainsi, afin de représenter le fait que cette contrainte s'applique, pour une ligne de production donnée, uniquement sur les agrégats produits réellement fabriqués lors de la période considérée, une variable binaire $estPdt_{p,l,t}$ a été introduite. Celle-ci, pour chaque triplet $(p, l, t) \in P \times L \times T$, prend la valeur 1 si l'élément p est fabriqué sur la ligne de production l lors de la période t . Dans ce contexte, l'inégalité (28) se réécrit alors, d'une manière linéaire sous la forme des trois inégalités suivantes :

$$M \times estPdt_{p,l,t} \geq qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (57)$$

$$estPdt_{p,l,t} \leq qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (58)$$

$$qte_{p,l,t} \geq volmin_l \times estPdt_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (59)$$

Remarquons que les deux premières inéquations (57-58) ont uniquement pour but d'affecter la valeur adéquate aux différentes variables binaires $estPdt_{p,l,t}$; celles-ci étant ensuite réutilisées au sein de (59) afin d'imposer que dès lors qu'une production est effectuée sur une ligne de production, elle respecte les contraintes de quantité minimum à produire.

Bien entendu, ces décisions de production doivent être prises au regard des capacités disponibles, ceci faisant l'objet d'autres contraintes linéarisées au sein de la partie suivante.

3.2. Contraintes de capacités

Conformément aux éléments indiqués précédemment, les contraintes de capacités revêtent plusieurs aspects. Ainsi, elles sont associées à la fois au nombre d'éléments pouvant être fabriqués lors d'une même période sur une même ligne de production mais également à la flexibilité de ces dernières. Ce dernier point correspond au nombre maximal de familles de standardisation différentes pouvant être produites lors d'une même période auquel il convient d'ajouter la notion de pertes de capacités. Afin de représenter ces différents éléments sous une forme linéaire, il a tout d'abord été nécessaire de définir des inéquations permettant l'attribution de valeurs adéquates aux variables binaires $estPdtFL_{f,l,t}$ (f, l, t) $\in FS \times L \times T$. Ainsi, ont été introduites les inégalités suivantes en lieu et place de (29).

$$M \times estPdtFL_{f,l,t} \geq \sum_{p \in f} qte_{p,l,t}, \forall f \in FS, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (60)$$

$$estPdtFL_{f,l,t} \leq \sum_{p \in f} qte_{p,l,t}, \forall f \in FS, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (61)$$

Remarquons que tout comme (57) et (58), ces deux inéquations se complètent. En effet, (60) impose, pour un triplet (f, l, t) $\in FS \times L \times T$ donné, que $estPdtFL_{f,l,t}$ prenne la valeur 1 si au moins un des agrégats produits constituant la famille f est fabriqué sur la ligne de production l lors de la période t tandis qu'aucune implication n'est introduite dans le cas contraire. A l'inverse, (61) prend son sens uniquement lorsqu'aucun des éléments de f n'est produit sur l en t , puisqu'alors la variable $estPdtFL_{f,l,t}$ est obligatoirement nulle. Ainsi, la combinaison de ces deux équations permet bien l'attribution de la valeur souhaitée en fonction des cas considérés.

D'une manière similaire au modèle non linéaire, cette variable binaire a ensuite été utilisée afin de modéliser la contrainte de nombre maximal de familles de standardisation différentes pouvant être fabriquées sur une même ligne de production lors d'une même période (inégalité (62) similaire à (30)),

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} \leq nbFL_l, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (62)$$

A l'inverse, la formulation des contraintes relatives aux pertes de capacités a dû faire l'objet de modifications. Ainsi, $pCapaLProd_{l,t}$, (l, t) $\in L \times T$ a été remplacée par la variable $pCapaVar_{l,t}$, (l, t) $\in L \times T$ permettant de comptabiliser le nombre de familles de standardisation produites, au sein d'une même ligne de production lors d'une unique période, dès lors qu'il excède la valeur 1. Ainsi, il s'est avéré nécessaire d'introduire, en remplacement de (31), les deux inéquations (63) et (64).

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} - 1 \leq pCapaVar_{l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (63)$$

$$pCapaVar_{l,t} \leq \sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (64)$$

Notons que l'inéquation (63) est uniquement contraignante dans le cas où le nombre de familles de standardisation, fabriqué sur la ligne de production considérée lors de la période considérée, est supérieure ou égale à 2, auquel cas, la variable $pCapaLProd_{l,t}$ doit prendre une valeur supérieure ou égale à celui-ci diminué de 1. L'inégalité (64), quant à elle, contraint la valeur de cette dernière variable à être inférieure à ce même nombre de famille. De par ce remplacement de l'équation (31), la contrainte (32) a, elle-aussi, dû être modifiée. Ainsi, a été introduite l'inégalité (65) imposant que la quantité d'éléments fabriquée sur une ligne de production lors d'une période donnée, n'excède pas sa capacité diminuée des pertes issues du nombre de familles de standardisation différentes produites.

$$\sum_P qte_{p,l,t} \leq capa_{l,t} - pCapaVar_{l,t} \times pCapa, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (65)$$

Notons que de par (63) et (64), pour un couple $(l, t) \in L \times T$, $pCapaVar_{l,t}$ ne prendra pas obligatoirement la valeur $\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t}$ mais pourra être égale à cette somme diminuée de un. Cependant, de par (65), restreignant les capacités des lignes de production en fonction de celle-ci, elle aura tendance à prendre la valeur la plus faible à savoir $(\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} - 1)$. Ainsi, (64) constitue, en réalité, d'avantage une coupe destinée à accélérer la résolution du modèle qu'une contrainte réelle ; celle-ci ayant pu être omise sans pour autant altérer la validité du modèle.

Outre la planification de la production, le modèle (20-51) comprend également une partie dédiée à l'évaluation du nombre de changements d'affectation de production vis-à-vis de la solution initiale, ces éléments faisant l'objet de la partie suivante.

3.3. Contraintes inhérentes à la solution initiale

Les contraintes inhérentes à la prise en compte de la solution initiale concernent différents aspects. Parmi ceux-ci se trouvent l'évaluation et la limitation du nombre de changements d'affectation des agrégats produits aux usines.

3.3.1. Limitation du nombre de changements d'affectation

L'évaluation ainsi que la limitation du nombre de changements d'affectation des agrégats produits vis-à-vis de la solution initiale sont représentées, au sein de la formulation non linéaire, par l'intermédiaire des inégalités (44-46). Afin de linéariser ces différentes contraintes, et notamment (44), il s'est avéré nécessaire d'introduire une variable binaire supplémentaire $CAU_{p,u}$ valant 1 si l'agrégat produit p a fait l'objet d'un changement d'affectation afin d'être affecté à l'usine u et 0 sinon. De plus, afin de modéliser les caractéristiques propres aux nouveaux éléments, un paramètre binaire $nouvPdt_p$ a également été défini, celui-ci valant 1 dans le cas où p correspond à un nouvel agrégat produit et 0 sinon. Ces différents éléments ont ensuite été intégrés au sein d'une série de contraintes permettant de linéariser les inégalités (44-45), en l'occurrence :

$$allocation_{p,u} \leq allocation_{p,u}^{init} + CAU_{p,u} + nouvPdt_p, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (66)$$

$$CAU_{p,u} + nouvPdt_p \leq 1, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (67)$$

$$allocation_{p,u}^{init} + CAU_{p,u} \leq 1, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (68)$$

$$\sum_U CAU_{p,u} \leq CA_p \times M, \forall p \in P \quad (69)$$

$$\sum_U CAU_{p,u} \geq CA_p, \forall p \in P \quad (70)$$

$$\sum_P CA_p \leq nbMaxCA \quad (71)$$

$$CAU_{p,u} \leq \sum_T \sum_{l \in u} qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (72)$$

$$allocation_{p,u} - M \times (1 - nouvPdt_p) \leq \sum_T \sum_{l \in u} qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (73)$$

L'inéquation (66) implique que pour qu'un agrégat produit p soit affecté à une usine u , il doit soit y être initialement alloué ($allocation_{p,u}^{init} = 1$), soit avoir fait l'objet d'un changement d'affectation ($CAU_{p,u}=1$) ou encore être nouveau. Notons que ces possibilités sont exclusives, c'est-à-dire qu'un agrégat produit ne peut être considéré comme ayant fait l'objet d'un changement d'affectation s'il est nouveau (contrainte 67) tout comme il ne peut faire l'objet d'un changement d'affectation vers une usine alors même qu'il y était déjà affecté initialement (inéquation (68)). Outre la détermination de la nouvelle affectation des agrégats produits aux usines, ces inégalités permettent également de définir pour chaque couple $(p, u) \in P \times U$ la valeur de la variable binaire $CAU_{p,u}$ indiquant le fait que p a fait l'objet d'un changement d'affectation à destination de u . Ces dernières variables sont ensuite réutilisées au sein des équations (69-70) afin d'attribuer, pour chaque agrégat produit p , la valeur 1 à CA_p si celui-ci a fait l'objet d'au moins une modification de son affectation initiale (i.e si $\sum_U CAU_{p,u} \geq 1$) et 0 sinon (i.e $\sum_U CAU_{p,u} = 0$) cette variable étant alors réutilisée au sein de (71) afin de limiter le nombre de changements d'affectations réalisés. L'inégalité (72), quant à elle, impose que dès lors qu'un élément est affecté à une usine suite à un changement d'affectation ; celui-ci y soit fabriqué au moins une fois sur l'ensemble de l'horizon, tandis que (73) modélise la même contrainte pour les nouveaux agrégats. En effet, pour un couple $(p, u) \in P \times U$, celle-ci est active uniquement lorsque $allocation_{p,u}$ et $nouvPdt_p$ prennent simultanément la valeur 1. Dans ce cas, elle impose que la quantité d'éléments p fabriquée en u sur l'ensemble de l'horizon soit strictement positive.

A ces restrictions portant sur la quantité de changements possibles vis-à-vis de la solution initiale, il convient d'ajouter celles relatives au nombre maximal d'agrégats produits pouvant faire l'objet d'une multi-affectation.

3.3.2. Contraintes relatives au nombre d'agrégats produits alloués à plus d'une usine

La contrainte restreignant le nombre d'agrégats produits différents affectés à plusieurs usines est initialement modélisée par les inégalités (41-43). Celles-ci, non linéaires, ont dû faire l'objet de changements afin de se rapporter aux trois équations visibles ci-dessous.

$$\sum_U allocation_{p,u} \leq 1 + mA_p \times M, \forall p \in P \quad (74)$$

$$\sum_P mA_p \leq nbMA \quad (75)$$

$$mA_p = 0, \forall p \in P \setminus P^{ma} \quad (76)$$

L'unique modification introduite, par rapport à la formulation précédente concerne (41) qui est remplacée par (74). Cette dernière impose que dès lors qu'un agrégat produit p est alloué à plus d'une usine ($\sum_u allocation_{p,u} \geq 2$), celui-ci soit considéré comme un produit multi-affecté (i.e $mA_p = 1$).

Ces différents éléments ne sont pas les seuls à avoir fait l'objet de changements vis-à-vis de la formulation initiale. En effet, de nombreuses modifications ont été apportées aux inégalités (35-40), représentant l'ensemble des contraintes de gestion des ressources.

3.4. Contraintes de gestion des ressources

Les contraintes relatives à la gestion des ressources présentes au sein de la formulation mathématique initiale (21-51) ont pour désavantage de ne pas être linéaires. Ainsi, celles-ci ont dû être totalement réécrites à commencer par celles associées au dimensionnement ainsi qu'à la répartition des ressources.

3.4.1. Contraintes de dimensionnement des ressources

Les contraintes associées au dimensionnement ainsi qu'à la répartition périodiques des ressources entre les différentes usines sont, au sein de la formulation mathématique initiale, représentée par l'intermédiaire des équations non linéaires (35), (36), (37) et (38). Celles-ci ont été reformulées par l'intermédiaire des 9 inégalités (77-85). Ces dernières ont recours à une nouvelle variable, à savoir $rLProd_{p,l,t}$, $(p, l, t) \in P \times L \times T$ représentant le nombre de ressources dédiées à un agrégat produit p affectées à la ligne de production l considérée durant une période donnée t . Comme illustré ci-dessous, celle-ci est utilisée afin d'effectuer un dimensionnement des ressources associées aux nouveaux agrégats produits ainsi qu'à ceux ayant fait l'objet d'un changement d'affectation, tandis qu'elle prend la valeur 0 pour les autres.

$$\sum_u nbrU_{p,u,t} = nbTR_p, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (77)$$

$$\sum_{l \in u} qte_{p,l,t} \leq nbrU_{p,u,t} \times prod_p, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (78)$$

$$estPdt_{p,l,t} \times qtmin_l \leq nbrU_{p,u,t}, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall l \in u, \forall t \in T \quad (79)$$

$$nbTR_p \leq nbTR_p^{init} + (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P \quad (80)$$

$$nbTR_p \geq nbTR_p^{init} - (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P \quad (81)$$

$$rLProd_{p,l,t} \geq \frac{qte_{p,l,t}}{prod_p} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (82)$$

$$rLProd_{p,l,t} \geq qtmin_l \times estPdt_{p,l,t} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (83)$$

$$nbrU_{p,u,t} \geq \sum_{l \in u} rLProd_{p,l,t} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (84)$$

$$rLProd_{p,l,t} \leq (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (85)$$

La contrainte (77) ne constitue pas une différence importante par rapport à la formulation initiale. Ainsi, elle impose que le nombre total de ressources associées à chaque agrégat produit soit constant tout au long de l'horizon. En ce qui concerne les inégalités (78) et (79), celles-ci constituent une simplification de la contrainte relative au nombre minimum de ressources associé

aux différentes lignes de production. Ainsi, conformément aux éléments indiqués dans la partie 2.3 de ce chapitre, la première impose que le nombre de ressources de type p affectées à l'usine u soit suffisant afin de satisfaire la totalité des volumes produits au sein de celles-ci lors de la période considérée. La seconde, quant à elle, porte sur le respect individuel du nombre minimum de ressources à associer à une ligne de production. Ainsi, elle impose à chaque période, qu'au sein de l'usine considérée, la quantité de ressources disponibles soit supérieure au nombre minimum associée à chacune des lignes de production fabriquant le produit considéré. Ainsi, cette dernière utilise la variable $estPdt_{p,l,t}$ qui, pour mémoire, vaut 1 lorsque l'agrégat p est effectivement fabriqué en l lors de la période t . Ces deux contraintes permettent donc de représenter, sous une forme linéaire, l'équation (38) du modèle précédent, à savoir la gestion de la répartition des ressources entre les différentes usines lors de chaque période.

Les inégalités (80) et (81), quant à elles, concernent uniquement les agrégats produits n'ayant pas fait l'objet d'un quelconque changement d'affectation et n'étant pas nouveaux. En effet, elles sont actives uniquement lorsque CA_p et $nouvPdt_p$ sont nuls, auquel cas, leur combinaison impose que le dimensionnement des ressources associées à l'agrégat produit considéré p soit identique à celui défini dans la configuration initiale. A l'inverse, les équations (82)-(84) ne sont actives que lorsque l'agrégat produit p considéré est nouveau ou bien a fait l'objet d'un changement d'affectation. En effet, dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque CA_p et $nouvPdt_p$ sont nuls, celles-ci imposent qu'une variable supérieure ou égale à zéro soit plus grande qu'un nombre négatif ce qui, bien entendu, est toujours vrai. Ainsi, dans le cas d'un agrégat produit p ayant fait l'objet d'un changement d'affectation ou bien d'un nouveau, ces deux possibilités étant exclusives de par la contrainte (67) ; les équations (82) et (83) imposent, pour la ligne de production l ainsi que la période t considérées, que la variable $rLProd_{p,l,t}$ soit supérieure ou égale respectivement au nombre de ressources nécessaire à la fabrication de la quantité de produit p souhaitée ($qte_{p,l,t}$) et au nombre minimum de ressources associé à l (lorsque la quantité produite est non nulle i.e $estPdt_{p,l,t} = 1$). Ensuite, au sein de (84), les variables de ce type relatives à la période t ainsi qu'aux lignes de production situées dans l'usine u considérées, sont réutilisées. Plus, précisément, cette équation impose que la somme de ces dernières soit inférieure au nombre de ressources allouées à u en t relativement à l'agrégat p considéré ($nbrU_{p,u,t}$). La combinaison de ces trois inéquations assure donc que pour les nouveaux produits ainsi que ceux ayant subis un changement d'affectation, le nombre de ressources disponibles au sein de chaque usine à chaque période satisfasse l'intégralité des contraintes propres à leur gestion. De plus, associées à (77), elles assurent que le nombre total de ressources disponibles remplisse également ces restrictions. Ceci est donc conforme avec le fait que les contraintes de gestion des ressources aient été uniquement simplifiées dans le cas des anciens agrégats produits n'ayant pas fait l'objet d'un quelconque changement d'affectation par rapport à la solution initiale ; cet aspect étant d'ailleurs renforcé par (85) attribuant la valeur 0 à $rLProd_{p,l,t}$ pour tous les éléments p de ce type. Notons d'ailleurs, qu'elle constitue en réalité une contrainte de coupe ; celle-ci ayant pu être omise sans pour autant altérer la validité du modèle.

Les différentes inégalités de la formulation mathématique initiale (21-51) associées au dimensionnement des ressources ne sont pas les seules à avoir dû être transformées. Ceci est également le cas de celles relatives à l'évaluation des différents transferts réalisés entre les usines.

3.4.2. Evaluation du nombre de transferts de ressource entre les usines

L'évaluation du nombre total de ressources transférées étant initialement représenté par l'intermédiaire d'une contrainte non linéaire (équation (40)), a nécessité l'introduction d'un type de variables supplémentaire, à savoir $transfert_{u,p,t}, (u,p,t) \in U \times P \times T$, représentant le

nombre de ressources dédiées au produit p transférées vers l'usine u à la fin de la période $t-1$. Afin de permettre la définition de leurs valeurs, celles-ci ont été intégrées au sein de la contrainte suivante :

$$\text{transfert}_{u,p,t} \geq \text{nbr}U_{p,u,t} - \text{nbr}U_{p,u,t-1}, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (86)$$

Celle-ci impose que, pour chaque triplet $(u, p, t) \in U \times P \times T$, la variable $\text{transfert}_{u,p,t}$ soit supérieure à la variation de ressources relatives à p au sein de l'usine u entre les périodes t et $t-1$. Notons que lorsque cette variation est négative (i.e le nombre de ressources a diminué au sein de u entre t et $t-1$), celle-ci est inactive ; $\text{transfert}_{u,p,t}$ étant, par définition, positive. Ainsi, de par la pénalisation de cette dernière au sein de la fonction objectif, celle-ci sera minimisée et prendra par conséquent exactement la valeur $(\text{nbr}U_{p,u,t} - \text{nbr}U_{p,u,t-1})$ lorsqu'elle est positive et zéro sinon. Remarquons que seules les variations positives sont considérées. En effet, de par la contrainte (77), imposant que le nombre total de ressources, relativement à chaque produit, soit constant sur l'ensemble de l'horizon ; lors de chaque période la somme des variations négatives relativement à chaque produit est équivalente à la somme des positives. Ainsi, afin d'évaluer le nombre réel de transferts, il convient de ne considérer qu'un seul de ces deux types de variations.

Comme illustré tout au long des parties précédentes, la linéarisation de la formulation initiale (21)-(51) s'est traduite par la définition de variables supplémentaires. Celles-ci ont dû être intégrées au sein de la fonction objectif afin d'obtenir une nouvelle formulation de cette dernière en adéquation avec l'ensemble des modifications réalisées.

3.5. Formulation de la fonction objectif

Naturellement, l'objectif associé à la formulation mathématique (20)-(50), en l'occurrence la maximisation du profit, n'a pas changé lors du processus de linéarisation. Cependant, sa formulation a été modifiée afin de tenir compte des différents paramètres supplémentaires introduits. Le premier de ces changements concerne le calcul, initialement réalisé par l'intermédiaire de la contrainte (47), du nombre total d'usines utilisées afin de fabriquer les différents agrégats produits de chaque famille de standardisation. Celui-ci a nécessité l'introduction d'une variable binaire supplémentaire $\text{estPdtFamUsine}_{u,f}$ prenant, pour chaque couple $(u, f) \in U \times F$, la valeur 1 dans le cas où un ou plusieurs éléments de la famille f est (sont) fabriqué(s) au sein de l'usine u lors d'au moins une période de l'horizon. Afin d'attribuer à ces différentes variables, les valeurs adéquates, une inéquation supplémentaire a été introduite. Celle-ci visible ci-dessous (inégalité (87)) contraint, pour chaque couple $(u, f) \in U \times F$, $\text{estPdtFamUsine}_{u,f}$ à prendre la valeur 1 si au moins un élément de f est réalisé au sein de u lors d'une période quelconque. Pour se faire, elle réutilise la variable $\text{estPdtFL}_{f,l,t}, (f, l, t) \in F \times L \times T$, introduite précédemment.

$$\sum_T \sum_{l \in U} \text{estPdtFL}_{f,l,t} \leq \text{estPdtFamUsine}_{u,f} \times M, \forall u \in U, \forall f \in F \quad (87)$$

Ainsi, de par l'introduction de cette contrainte, le nombre total d'usines utilisées pour la production de tous les éléments d'une famille f correspond tout simplement à la somme des variables $\text{estPdtFamUsine}_{u,f}$ associés, c'est-à-dire $\sum_U \text{estPdtFamUsine}_{u,f}$. Notons que cette dernière somme correspond à la variable nbUsine_f utilisée dans la précédente formulation.

Concernant les autres modifications apportées à la fonction objectif, celles-ci n'ont pas requis l'introduction de variables ni de contraintes supplémentaires. Ainsi, l'évaluation du nombre

de transferts réalisés et la quantité de changements opérés par rapport à la solution initiale, ont été représentés, respectivement, par l'intermédiaire des sommes $\sum_U \sum_P \sum_T \text{transfert}_{u,p,t}$ et $\sum_P CA_p$ en lieu et place de $\sum_P nbTr_p$ et $nbCA$.

Dans ce contexte, la fonction objectif s'exprime désormais sous la forme des équations (88)-(91) introduites ci-dessous.

$$\text{Max} : CA - CC - CO \quad (88)$$

$$CA = \sum_P \sum_T sd_{p,t} \times pvente_p \quad (89)$$

$$CC = \sum_P cr_p \times nbTR_p + pCA \times \sum_P CA_p \quad (90)$$

$$CS = \sum_p (ctr \times \sum_U \sum_{T,t>1} \text{transfert}_{u,p,t} + \sum_T (cstock \times stock_{p,t} + \sum_L qte_{p,l,t} \times cprod_{p,l})) + pFS \times \sum_{FS} \sum_U estPdtFamUsine_{u,f} \quad (91)$$

3.6. Modèle linéaire : formulation générale

Maintenant que l'intégralité des différentes contraintes ainsi que la fonction objectif du MILP ont été introduites, il convient de le reformuler dans son intégralité. Cependant, auparavant, rappelons l'ensemble des différents paramètres et variables additionnels définis. Celui-ci est ainsi formé de :

$allocation_{p,u}^{init}, p \in P, u \in U$: paramètre binaire valant 1 si le produit p est initialement affecté à l'usine u et 0 sinon;
$allocation_{p,u}, p \in P, u \in U$: variable binaire valant 1 si, dans la nouvelle solution, le produit p est affecté à l'usine u et 0 sinon;
$estPdt_{p,l,t} (p, l, t) \in P \times L \times T$: variable binaire valant 1 si la ligne de production l fabrique au moins un élément de type p lors de la période t et 0 sinon;
$pCapaVar_{l,t}, (l, t) \in L \times T$: nombre de famille de standardisation différentes fabriquées au sein de la ligne de production l lors de la période t ;
$CAU_{p,u}, (p, u) \in P \times U$: variable binaire valant 1 si l'agrégat produit p a fait l'objet d'un changement d'affectation vers l'usine u et 0 sinon ;
$nouvPdt_p, p \in P$: variable binaire valant 1 si l'agrégat produit p est nouveau et 0 sinon ;
$rLProd_{p,l,t}, (p, l, t) \in P \times L \times T$: nombre de ressources dédiées à l'agrégat produit p affectée à la ligne de production l lors de la période t (active uniquement pour les nouveaux agrégats et ceux ayant faits l'objet d'un changement d'affectation) ;
$\text{transfert}_{u,p,t}, (u, p, t) \in U \times P \times T$: nombre de ressources dédiées à l'agrégat produit p transférées vers l'usine u à la fin de la période $t-1$;

$estPdtFamUsine_{u,f}, (u, f) \in U \times F$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille f est fabriqué au sein de l'usine u lors d'une période de l'horizon.

Dans ce contexte, le modèle linéaire correspondant au problème ASPDRF dans un contexte déterministe se formule par l'intermédiaire des équations (92)-(133).

$$\text{Max} : CA - CC - CO \quad (92)$$

$$CA = \sum_P \sum_T sd_{p,t} \times pvente_p \quad (93)$$

$$CC = \sum_P cr_p \times nbTR_p + pCA \times \sum_P CA_p \quad (94)$$

$$CS = \sum_p (ctr \times \sum_U \sum_{T,t>1} transfert_{u,p,t} + \sum_T (cstock \times stock_{p,t} + \sum_L qte_{p,l,t} \times cprod_{p,l})) + pFS \times \sum_{FS} \sum_U estPdtFamUsine_{u,f} \quad (95)$$

s.t.

$$sd_{p,t} \leq d_{p,t}, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (96)$$

$$stock_p^{init} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_p + stock_{p,1}, \forall p \in P, \forall l \in L \quad (97)$$

$$stock_{p,t-1} + \sum_L qte_{p,l,t} = sd_p + stock_{p,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t, t > 1 \quad (98)$$

$$\sum_T qte_{p,l,t} \leq M \times capab_{p,l}, \forall l \in L, \forall p \in P \quad (99)$$

$$\sum_{l \in U} \sum_T qte_{p,l,t} \leq M \times allocation_{p,u}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (100)$$

$$M \times estPdt_{p,l,t} \geq qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (101)$$

$$estPdt_{p,l,t} \leq qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (102)$$

$$qte_{p,l,t} \geq volmin_l \times estPdt_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (103)$$

$$M \times estPdtFL_{f,l,t} \geq \sum_{p \in f} qte_{p,l,t}, \forall f \in FS, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (104)$$

$$estPdtFL_{f,l,t} \leq \sum_{p \in f} qte_{p,l,t}, \forall f \in FS, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (105)$$

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} \leq nbFL_l, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (106)$$

$$\sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t} - 1 \leq pCapaVar_{l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (107)$$

$$pCapaVar_{l,t} \leq \sum_{FS} estPdtFL_{f,l,t}, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (108)$$

$$\sum_P qte_{p,l,t} \leq capa_{l,t} - pCapaVar_{l,t} \times pCapa, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (109)$$

$$allocation_{p,u} \leq allocation_{p,u}^{init} + CAU_{p,u} + nouvPdt_p, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (110)$$

$$CAU_{p,u} + nouvPdt_p \leq 1, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (111)$$

$$allocation_{p,u}^{init} + CAU_{p,u} \leq 1, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (112)$$

$$\sum_U CAU_{p,u} \leq CA_p \times M, \forall p \in P \quad (113)$$

$$\sum_U CAU_{p,u} \geq CA_p, \forall p \in P \quad (114)$$

$$\sum_P CA_p \leq nbMaxCA \quad (115)$$

$$CAU_{p,u} \leq \sum_T \sum_{l \in U} qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (116)$$

$$allocation_{p,u} - M \times (1 - nouvPdt_p) \leq \sum_T \sum_{l \in U} qte_{p,l,t}, \forall p \in P, \forall u \in U \quad (117)$$

$$\sum_U allocation_{p,u} \leq 1 + mA_p \times M, \forall p \in P \quad (118)$$

$$\sum_P mA_p \leq nbMA \quad (119)$$

$$mA_p = 0, \forall p \in P \setminus P^{ma} \quad (120)$$

$$\sum_U nbrU_{p,u,t} = nbTR_p, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (121)$$

$$\sum_{l \in U} qte_{p,l,t} \leq nbrU_{p,u,t} \times prod_p, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (122)$$

$$estPdt_{p,l,t} \times qtmin_l \leq nbrU_{p,u,t}, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall l \in U, \forall t \in T \quad (123)$$

$$nbTR_p \leq nbTR_p^{init} + (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P \quad (124)$$

$$nbTR_p \geq nbTR_p^{init} - (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P \quad (125)$$

$$rLProd_{p,l,t} \geq \frac{qte_{p,l,t}}{prod_p} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (126)$$

$$rLProd_{p,l,t} \geq qtmin_l \times estPdt_{p,l,t} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (127)$$

$$nbrU_{p,u,t} \geq \sum_{l \in U} rLProd_{p,l,t} - (1 - CA_p - nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (128)$$

$$rLProd_{p,l,t} \leq (CA_p + nouvPdt_p) \times M, \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (129)$$

$$transfert_{u,p,t} \geq nbrU_{p,u,t} - nbrU_{p,u,t-1}, \forall p \in P, \forall u \in U, \forall t \in T \quad (130)$$

$$\sum_T \sum_{l \in U} estPdtFL_{f,l,t} \leq estPdtFamUsine_{u,f} \times M, \forall u \in U, \forall f \in F \quad (131)$$

$$(sd_p, qte_{p,l,t}, stock_{p,t}, pCapaVar_{l,t}, CAU_{p,u}, CA_p, nbrU_{p,u,t}, nbTR_p, rLProd_{p,l,t}, pCapaLProd_{l,t}) \in N^{10}, \forall p \in P, \forall l \in U, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (132)$$

$$(allocation_{p,u}^{init}, allocation_{p,u}, estPdt_{p,l,t}, estPdtFL_{f,l,t}, nouvPdt_p, mA_p) \in \{0, 1\}^6, \forall p \in P, \forall l \in U, \forall l \in L, \forall t \in T. \quad (133)$$

Le modèle ainsi obtenu est composé d'un nombre non négligeable de contraintes dépendant de l'instance considérée. Ainsi, celui-ci peut être exprimé par l'intermédiaire de la taille des différents ensembles considérés c'est-à-dire sous la forme de l'équation suivante :

$$(|P| \times [5 + 8|L| \times |T| + 6|U| + 2|T| + |L| + 2|U| \times |T| + |U| \times |L| \times |T|] + |L| \times [2|FS| + 4|T|] + 2 + |U| \times |F| + |P \setminus P^{ma}|) \quad (134)$$

D'une manière similaire, le nombre total de variables peut être exprimé sous la forme de la somme suivante :

$$|P| \times [|T| + 3|L| \times |T| + 2|U| + 2|U| \times |T| + 3] + |FS|(|U| + |L| \times |T|) + |L| \times |T| \quad (135)$$

Ainsi, pour un problème à 100 produits, déjà commercialisés, constituant un ensemble de 10 familles de standardisation différentes et 10 lignes de production réparties dans 3 usines, considérés sur un horizon de 12 périodes, le nombre de contraintes s'élève à 121 712 et celui des variables à 46 650.

Maintenant que la formulation mathématique a été linéarisée sous la forme d'un MILP et que, par conséquent, elle peut être résolue, il convient d'introduire différentes applications numériques de celle-ci. Ces dernières présentées, au sein de la partie suivante, ont pour objectif d'approfondir les différentes explications données jusqu'à maintenant mais également de mettre en évidence les temps de résolutions associés en fonction de la taille des instances considérées.

3.7. Applications numériques

L'introduction des différentes applications numériques, du MILP précédemment défini, revêt deux objectifs à savoir l'apport d'explications supplémentaires quant au fonctionnement de celui-ci et l'illustration des temps de résolution associés. Ainsi, différentes instances du problème modélisé ont été considérées à commencer par une relativement petite en terme de données ; celle-ci présentant l'avantage de faciliter l'exploitation ainsi que l'explication des résultats obtenus. Notons qu'afin de construire ces tests, la demande des différents agrégats produits, les capacités ainsi que les coûts ont été générés aléatoirement. Cependant, ceci a été réalisé tout en prenant soin de faire intervenir une saisonnalité au niveau de la demande et des capacités; le but étant de se rapprocher de situations pouvant effectivement se produire dans un contexte industriel. Autrement dit, bien que purement fictives, les applications numériques construites traduisent des phénomènes pouvant intervenir dans un contexte réel.

3.7.1. Exploitation des résultats : illustration

Afin de faciliter l'explication des résultats provenant du modèle linéaire, a été considéré le cas d'un système de production constitué de 10 lignes de productions réparties au sein de 5 usines et fabriquant un ensemble de 20 agrégats produits constituant 8 familles de standardisation. Parmi ceux-ci, se trouvent 5 éléments considérés comme n'ayant jamais été commercialisés auparavant. Ainsi, à l'inverse des autres, pour ces derniers les changements d'affectation vis-à-vis de la solution initiale ne sont pas pénalisés tandis que le dimensionnement de leurs ressources doit être réalisé bien qu'une valeur ait été proposée pour chacun d'eux. A ce propos, notons que le nombre maximum de changements d'affectation possible a été fixé à 20. Autrement dit, la modification totale de la configuration initiale a été autorisée. Notons que, bien que la charge et la capacité soient équilibrées sur l'ensemble de l'horizon (sous-charge de 0,22%), périodiquement des déséquilibres conséquents peuvent apparaître ; ceci étant illustré par

l'intermédiaire de la Figure 22. L'instance du modèle linéaire (92)-(133) ainsi définie a été résolue, à l'aide du solveur CPLEX, pour un horizon de 12 périodes.

Dans le but de ne pas aboutir à des durées d'exécution trop importantes, la résolution a été interrompue au bout de 6h00 de temps de calcul, celle-ci se situant à 5,56% de la borne inférieure déterminée par Cplex. Cette dernière est issue de la partie du Branch&Bound non encore explorée lors de l'arrêt du programme. Elle correspond ainsi à la fonction objectif d'une solution en partie continue et constitue donc, à ce titre, une borne théorique. De par l'étude des différents éléments fournis par le solveur, nous pouvons constater que, comme attendu, la résolution ne s'est pas effectuée d'une manière linéaire. Ainsi, comme indiqué sur le Tableau 3, la première solution réalisable a été obtenue au bout de 2270s (soit 37 minutes et 50 secondes). Celle-ci, se situant à environ 20% de la solution optimale a été rapidement améliorée avant de stagner (gain de seulement 1,5% en 17356 secondes soit en 4 heures 49 minutes et 16 secondes).

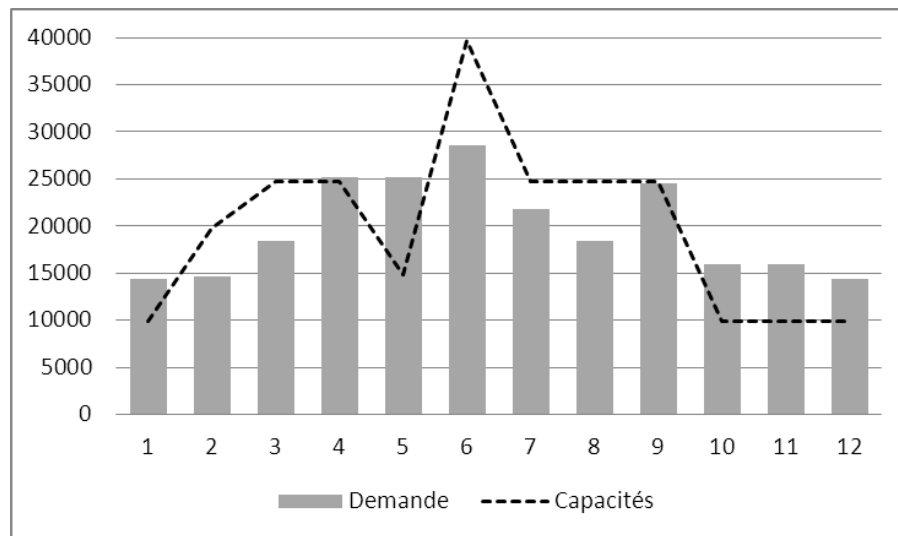


Figure 22 : Equilibre charge – capacité de la première instance

Temps d'exécution (s)	Ecart estimé avec la solution optimale (%)
2 270	20,00
2 641	11,41
2 642	9,47
4 244	7,00
4 639	6,60
10 488	6,58
14 126	6,36
15 941	6,23
21 426	5,71
21 600	5,56

Tableau 3 : Temps associés à la résolution du modèle linéaire dans le cas de la première instance

Les premiers paramètres des résultats à analyser, afin d'illustrer le fonctionnement ainsi que le champ d'application du modèle linéaire, concernent la différence entre la configuration initiale et la solution obtenue. Ainsi, il convient tout d'abord de s'intéresser aux différents indicateurs

associés à commencer par la valeur de la fonction objectif. Alors que celle-ci s'élevait à $4,27.10^6$ dans le cas de la configuration initiale, sa valeur a atteint $4,59.10^6$ pour la nouvelle solution, ce qui représente une amélioration de plus de 2%. D'une manière similaire et comme illustré sur les Figure 23 et Figure 24, le volume de la demande satisfaite dans le cas de la solution obtenues par le GRASP est plus élevé que dans le cas de la configuration initiale (95% contre 91%).

L'obtention de tels résultats s'est traduite par la réalisation de 17 changements d'affectation, 3 d'entre eux concernant de nouveaux agrégats produits. De plus, alors même qu'initialement seuls trois éléments étaient affectés à plus d'une usine, leur nombre est passé à 5 dans le cadre de la nouvelle solution. Ces différents éléments ont bien entendu eu des répercussions sur la manière avec laquelle la production a été planifiée afin de satisfaire la demande. Ainsi, dans le cas de la nouvelle solution, les stocks ainsi que les pertes de capacités sont plus élevés (voir Tableau 4). Ceci est à mettre au regard du nombre de ressources utilisées. Ainsi, dans le cas de la nouvelle solution celles-ci ont été réduites de 11% (141 contre 159). Autrement dit, compte tenu du scénario de coûts adopté, il est préférable de recourir à moins de ressources, quitte à entraîner d'avantage de pertes de capacités et de stocks, afin de satisfaire la demande. Ces différents éléments peuvent être retrouvés sur les Figure 25 et Figure 26 illustrant le profil d'utilisation des capacités pour la configuration initiale et la nouvelle solution. Ainsi, nous pouvons par exemple noter que les pertes de capacités sont plus élevées dans le cas de la seconde solution que dans le cas de la première.

Solution	Stocks	Total des capacités perdues	Nombre de ressources
Configuration initiale	101 162	6 300	159
Nouvelle solution	110 175	6 900	141

Tableau 4 : Comparaison des planifications associées à la configuration initiale ainsi qu'à la nouvelle solution

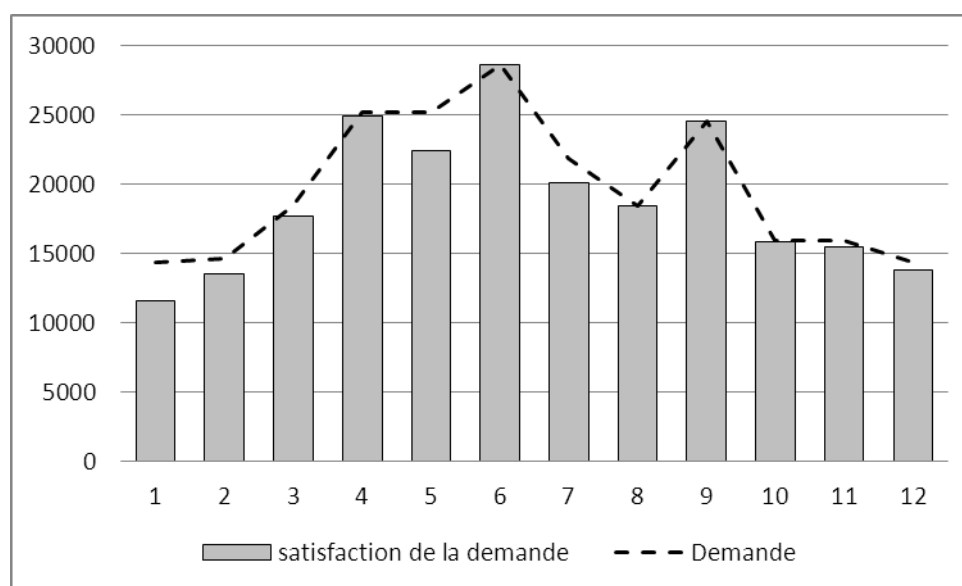


Figure 23 : Satisfaction de la demande périodique dans le cas de la configuration initiale

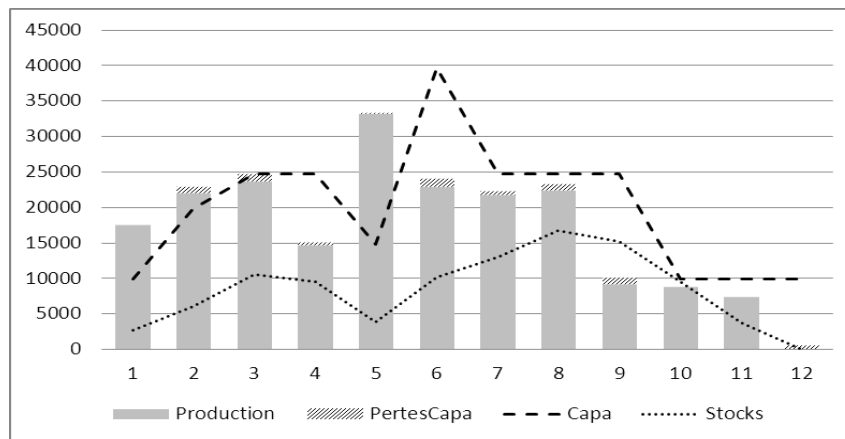


Figure 24 : Satisfaction de la demande périodique associée à la meilleure solution obtenue par le GRASP

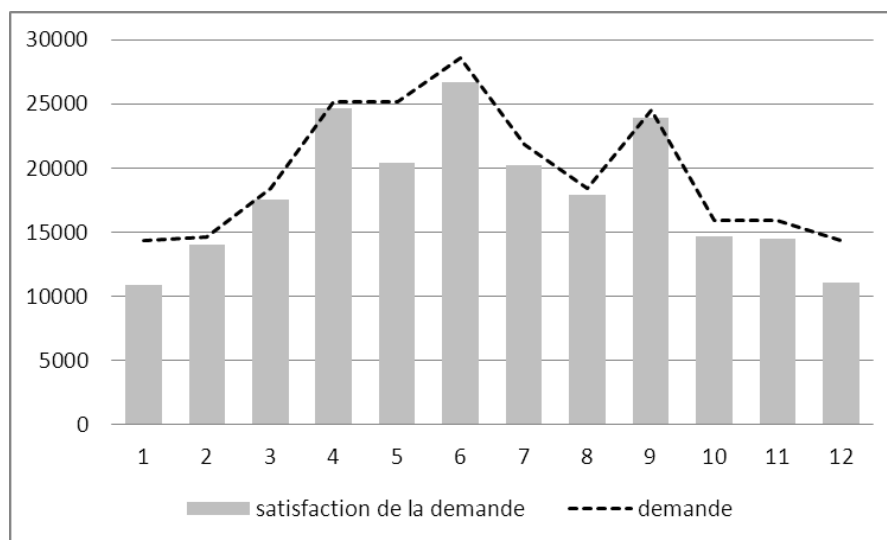


Figure 25 : Utilisation capacitaire des lignes de production dans le cas de la solution initiale

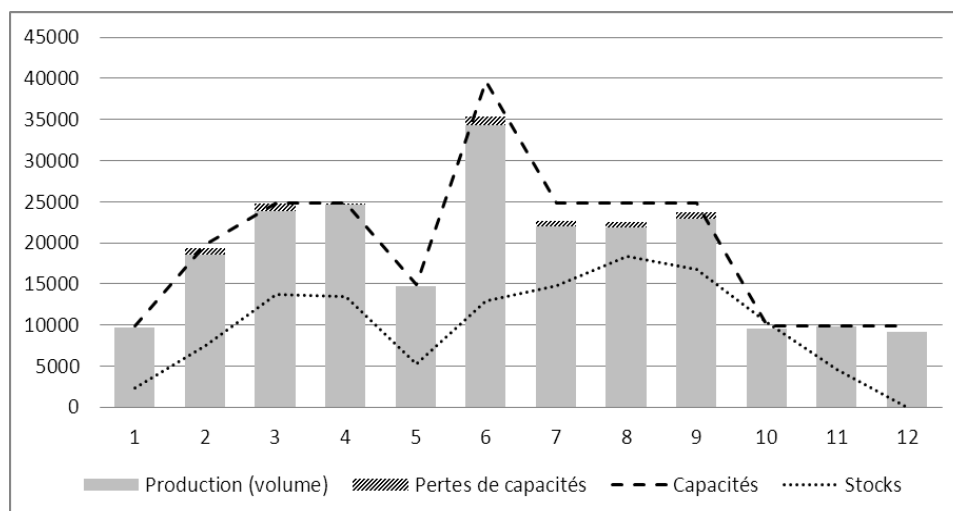


Figure 26 : Utilisation capacitaire des lignes de production dans le cas de la nouvelle solution

Cependant, il convient de noter que les différences en termes de pertes de capacités proviennent de la planification réalisée sur une unique ligne de production. En effet, comme illustré sur le Tableau 5, toutes les lignes de production ont un nombre moyen de familles fabriquées par période identique hormis la 6. En effet, comme illustré sur la Figure 27, lors de la première et des trois dernières périodes, le nombre de familles de standardisation produites sur cette ligne de production est plus élevé dans le cas de la nouvelle solution que de la configuration initiale alors qu'il est identique sur le reste de l'horizon de planification.

Ligne de production	Solution initiale	Nouvelle solution
1	1,00	1,00
2	1,25	1,25
3	1,58	1,58
4	1,41	1,41
5	1,00	1,00
6	1,00	1,00
7	1,75	1,75
8	1,58	1,91
9	1,41	1,41
10	1,50	1,50

Tableau 5 : Nombre moyen de familles de standardisation différentes fabriquées au sein de chaque ligne de production lors d'une même période

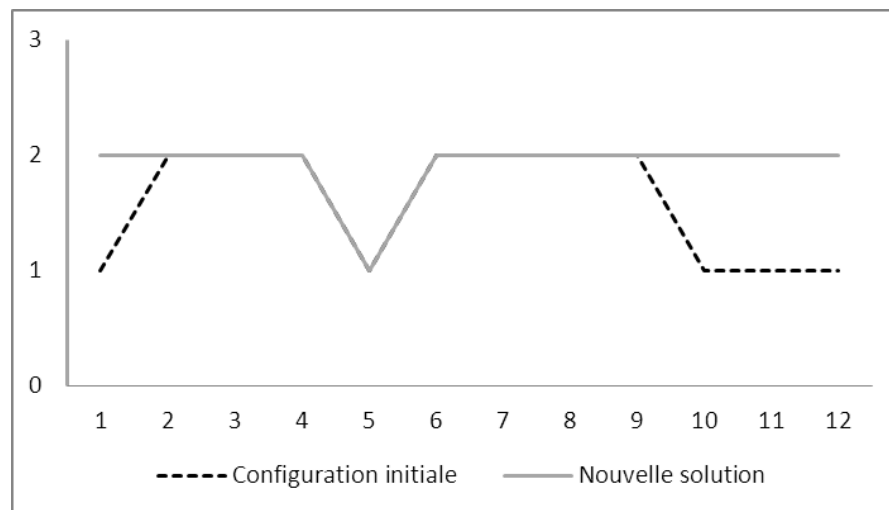


Figure 27 : Nombre de familles de standardisation différentes fabriquées à chaque période sur la ligne de production 8

Maintenant que le fonctionnement du modèle linéaire ainsi que la nature des résultats obtenus ont été illustrés, il convient de s'intéresser d'une manière plus approfondie aux temps d'exécution associés ; un premier aperçu ayant été donné dans cette partie.

3.7.2. Etude des temps de résolution associés

Un des éléments les plus importants relatif à la définition d'un modèle linéaire correspond à son temps de résolution. Celui-ci étant, bien entendu, dépendant du nombre de variables et de contraintes considérées, caractérise sa capacité à résoudre des instances de plus ou moins grandes tailles. Afin d'illustrer cet aspect et en plus de celui introduit lors de la partie précédente, 6 tests supplémentaires ont été réalisés ; les caractéristiques associées aux 7 instances résultantes étant présentées par l'intermédiaire du Tableau 6. Comme indiqué, les 3 premières correspondent à une variation du nombre de produits considérés, les 2 suivantes à celle du nombre de périodes, tandis que le dernier test correspond au cas d'un problème de taille beaucoup plus importante.

Afin de les évaluer, ces différentes instances ont été résolues à l'aide du logiciel Cplex. Pour chaque résultat ont été sauvegardés, respectivement, la durée nécessaire à l'obtention d'une première solution réalisable ainsi que l'écart entre la meilleure obtenue au bout de 6h00 de temps de calcul et la borne inférieure déterminée par le solveur. Notons que cette dernière correspond à la valeur d'une solution relaxée, c'est-à-dire ne satisfaisant pas l'ensemble des contraintes considérées. Aussi, elle constitue une borne à priori inatteignable par une solution entière. Cependant, elle présente l'avantage de donner une estimation fiable de la qualité des résultats obtenus. A travers l'analyse de ces derniers, visibles sur le Tableau 7, la première chose à noter est le fait que les temps nécessaires à l'obtention d'une première solution réalisable sont d'autant plus importants que la taille de l'instance considérée est grande. D'ailleurs, dans le cas des deux derniers problèmes, aucune solution réalisable n'a pu être obtenue en 6h00 de temps de calcul et, ce, alors même que la solution initiale satisfait, elle, l'intégralité des contraintes. En ce qui concerne la qualité des résultats associés aux autres instances, nous pouvons remarquer que les solutions obtenues se situent à une distance, comprise entre 5% et 9% de la meilleure borne inférieure déterminée par Cplex. Ainsi, même pour des petites instances, aucune solution optimale n'a pu être générée. Notons que le nombre de variables et de contraintes ne constituent pas les seuls critères expliquant les temps de résolution ainsi que la qualité des résultats obtenus. En effet, nous pouvons constater qu'alors même qu'elle est plus petite que la troisième pour laquelle une solution réalisable a été obtenue, aucune n'a pu être construite pour la sixième instance. Ainsi, aucune généralité ne peut être définie concernant les temps de résolution associés à un problème même si, d'ordre général, plus une instance est grande plus elle sera difficile et longue à résoudre.

Instance	Nombre d'usines	Nombre de ligne de production	Nombre d'agrégats produits	Nombre de famille de standardisation	Nombre de périodes	Nombre de variables	Nombre de contraintes
1	5	10	20	7	12	10 409	35 652
2	5	10	40	8	12	20 536	70 677
3	5	10	80	8	12	40 736	140 677
4	5	10	20	7	24	20 453	70 212
5	5	10	20	7	36	30 497	104 772
6	5	10	20	7	48	40 541	139 332
7	5	10	200	7	24	199 913	691 887

Tableau 6 : Temps de résolution pour la première instance du modèle linéaire

Instance	Temps nécessaire à l'obtention d'une première solution réalisable	Ecart entre la solution finale et la borne théorique (%)
1	2 400s (40min)	5,56%
2	1 401 (23min 21s)	2,24%
3	13 805s (3h 13min 25s)	8,38%
4	3 800 (1h 03min 20s)	4,16%
5	13 955s (3h 52min 35s)	7,01%
6	Pas de solution réalisable	
7	Pas de solution réalisable	

Tableau 7 : Temps d'exécution associés aux différentes solutions

A titre illustratif et afin de mettre en évidence la pertinence de notre modèle, les résultats obtenus pour ces différentes instances ont été comparés avec ceux issus de l'évaluation des configurations initiales associées. Ainsi, comme reporté sur le Tableau 8, les trois premiers tests ont, logiquement, conduits à l'obtention de solutions présentant une meilleure fonction objectif que la configuration initiale. A l'inverse, dans le cas des instances 4 et 5, les solutions obtenues s'avèrent être de plus mauvaises qualités que l'affectation initialement proposée. Ceci provient du fait que, lors de l'arrêt du programme, la solution courante ne correspondait pas à la solution optimale. Autrement dit, de par le processus adopté, alors même que la configuration d'affectation initiale est immédiatement accessible, le solveur peut en proposer une autre de plus mauvaise qualité en cas d'arrêt de la résolution avant l'atteinte de la solution optimale.

Instance	Fonction objectif associée à la configuration initiale ($\cdot 10^3$)	Amélioration de la configuration initiale par la meilleure solution obtenue (%)
1	4 510	+1,77%
2	9 392	+2,01%
3	17 771	+0,15%
4	9 445	-0,62%
5	14 069	-2,69%
6	18 880	/
7	44 461	/

Tableau 8 : Comparaison des résultats avec les configurations initiales associées

A travers les différents éléments indiqués tout au long de cette partie, nous pouvons constater que le recours à la programmation linéaire ne permet de pas de remplir l'un des objectifs de nos travaux de recherche, à savoir le développement de méthodes et modèles capables de résoudre des instances de tailles industrielles. En effet, aucune solution satisfaisant l'intégralité des contraintes n'a pu être obtenue en 6h00 de temps de calcul pour des problèmes de tailles intermédiaires. Autrement dit, la résolution du MILP associé à l'aide d'un solveur ne permet pas l'obtention de solutions réalisables et, ce, alors même qu'il pourrait en générer une en s'appuyant sur la configuration initiale qui satisfait, elle, l'intégralité des contraintes. Ainsi, il est apparu nécessaire de construire une méthode de résolution, certes approchée, mais également rapide permettant d'adresser des instances industrielles complexes.

4. Conclusion

Dans tout processus de modélisation d'un cas réel doit être réalisée une phase d'étude, d'appropriation et de simplification des différents paramètres associés dans le but de permettre leurs prises en compte. Ainsi, au cours de ce chapitre a été introduite la formalisation mathématique de la problématique d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte déterministe. Celle-ci s'est accompagnée d'une explication de la manière avec laquelle ont été considérées les différentes contraintes, ceci conduisant parfois à leur simplification. Dans un second temps, cette formalisation mathématique a été réexprimée par l'intermédiaire d'un modèle linéaire mixte en nombre entier (MILP) et, ceci, afin de permettre son utilisation pour la résolution d'instances spécifiques à l'aide de solveurs adaptés (Cplex, Gurobi,...).

Dans le but de mettre en évidence les différentes caractéristiques du MILP ainsi obtenu, différentes applications numériques ont été présentées. La première a constitué une illustration du fonctionnement du modèle tandis que les suivantes ont eu pour principal objectif de mettre en évidence les différents temps de résolution associés. Ceux-ci ont mis en évidence la difficulté liée à l'utilisation du modèle linéaire afin de résoudre des instances de grandes tailles. Plus précisément, ils ont permis d'illustrer l'importance des temps d'exécution associés à la résolution de problèmes comportant de nombreuses variables et contraintes ; caractéristiques premières des instances industrielles. Or, dans un tel contexte, la vitesse d'obtention de solutions réalisable est un paramètre clef. Ainsi, au-delà des temps de résolution, ces différents exemples numériques ont mis en évidence l'impossibilité de recourir à la programmation linéaire afin d'adresser des instances industrielles.

L'impossibilité d'utiliser le MILP ainsi développé constitue l'une des principales conclusions de ce chapitre. En effet, ceci illustre la nécessité de définir des méthodes de résolution alternatives, certes approchées mais permettant d'obtenir des solutions réalisables de bonnes qualités dans des temps beaucoup plus courts ; ces différents éléments constituant les principales caractéristiques des métaheuristiques. Ainsi, afin de satisfaire l'une des spécificités de nos travaux, à savoir la capacité à résoudre des instances industrielles, un GRAPS a été développé. Cependant, avant de présenter cette méthode approchée au sein du chapitre suivant, il convient de préciser que bien que le modèle linéaire ne puisse être utilisé afin de résoudre des instances industrielles, sa réalisation ne constitue pas une perte de temps. En effet, elle présente le mérite d'avoir permis de définir et modéliser précisément les différentes contraintes considérées ainsi que de mettre en évidence l'apport de notre démarche quant à l'amélioration de solutions initiales. De plus, elle apporte un outil simple d'analyse de la qualité de la métaheuristique développée et, ceci, par l'intermédiaire de la réalisation de comparaisons des résultats obtenus par ces deux approches et, ce, sur de petites instances.

Chapitre IV : Métaheuristique pour le problème ASPDRF

Partant du programme linéaire mix en nombre entier (MILP) proposé précédemment et compte tenu de sa difficulté à résoudre des problèmes de tailles importantes dans des temps adéquats, ce chapitre a pour objectif de présenter une métaheuristique capable d'adresser des instances importantes du problème ASPDRF. Celui-ci est ainsi constitué de la présentation des différents algorithmes constituant le GRASP proposé mais, également, d'un ensemble d'applications numériques permettant d'illustrer, d'une part, son fonctionnement et, d'autre part, la qualité des résultats obtenus ainsi que sa capacité à résoudre des instances industrielles.

Sommaire

Chapitre IV : Métaheuristique pour le problème ASPDRF	121
1. Introduction	125
2. Définition	125
2.1. Heuristique – Métaheuristique.....	125
2.2. Greedy Randomized Adaptative Search Procedure (GRASP).....	126
3. GRASP pour le problème ASPDRF dans un contexte déterministe.....	127
3.1. Fonctionnement global de la méthode.....	127
3.1.1. Principe de la méthode	127
3.1.2. Décomposition de la méthode en divers fonctions.....	128
3.2. Phase de construction d'une solution	130
3.2.1. Principe général.....	130
3.2.2. Choix des agrégats produits	131
3.2.3. Génération d'une affectation de la production à partir d'une solution initiale	132
3.3. Evaluation d'une solution.....	134
3.3.1. Principe général d'évaluation d'une solution.....	134
3.3.2. Calcul des quantités à produire et définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation	135
3.3.3. Planification	138
3.3.4. Phase de constitution des stocks.....	144
3.4. Calcul de la fonction objectif – dimensionnement des ressources	146
3.4.1. Dimensionnement des ressources.....	146
3.4.2. Evaluation des transferts de ressource	147
3.4.3. Fonction objectif : rappel et évaluation.....	151
3.5. Recherches locales.....	153
3.5.1. Principe générale de la recherche locale	153
3.5.2. Réduction du nombre d'agrégats produit multi-affectés.....	153
3.5.3. Réduction du nombre de changements d'affectations vis-à-vis de la solution initiale	154
4. Performance de la métaheuristique	155

4.1.	Evaluation de la qualité des résultats – prise en compte d’instances de petites tailles..	155
4.2.	Evaluation de la qualité du GRASP– Application à des instances de grande taille	160
4.3.	Paramétrage du Grasp : influence du nombre maximum de périodes de stocks et des quantités minimum à produire.....	167
4.4.	Evaluation des temps d’exécution	169
5.	Conclusion.....	171

Liste des figures

Figure 28 : Décomposition du GRASP en différentes fonction.....	129
Figure 29 : Exemple d'affectations ressources usines	148
Figure 30 : Exemple d'affectations ressources usines	149
Figure 31 : Graphe flot maximum à coût minimum pour l'évaluation des transferts de ressources associées à un agrégat produit p affecté à deux usines	150
Figure 32 : Satisfaction de la demande périodique en fonction des scénarios de coûts de stockage.....	157
Figure 33 : Satisfaction stocks périodiques en fonction des scénarios de coûts de stockage	158
Figure 34 : Pertes de capacités périodique en fonction des scénarios de coûts de stockage..	158
Figure 35: Equilibres charges – capacités associés aux instances 8-11	163
Figure 36 : Profil de production associé à la configuration initiale de l'instance 8	164
Figure 37 : Profil de production associé à la meilleure solution obtenue pour l'instance 8 ..	164
Figure 38: Répartition de la production dans le cas de la configuration initiale pour l'instance 8.....	165
Figure 39 : Répartition de la production dans le cas de la meilleure solution obtenue pour l'instance 8	165
Figure 40 : Répartition de la production dans le cas de la meilleure solution obtenue pour l'instance 9	166
Figure 41 : Valeur de la fonction objectif en fonction des tailles de campagne dans le cas de la cinquième instance	168
Figure 42 : Valeur de la fonction objectif en fonction du nombre maximal de périodes d'anticipation de la production autorisé dans le cas de la cinquième instance	169

Liste des tableaux

Tableau 9: Evaluation de la configuration initiale – comparaison des solutions issues de umodèle linéaire et du GRASP	157
Tableau 10: Meilleures solutions obtenues – comparaison des résultats issus du modèle linéaire et du GRASP	160
Tableau 11 : Instances de grandes tailles considérées.....	161
Tableau 12 : Résultats associés à l'application du GRASP dans le cadre d'instances de grande taille.....	161
Tableau 13: Evolution de la satisfaction de la demande et des stocks pour les différentes solutions générées	162
Tableau 14: : Modifications de la configurations initiales associées à la construction des solutions obtenues pour les différentes instances testées	167
Tableau 15 : Instances utilisées pour l'illustration des temps de résolution	170
Tableau 16 : Temps de résolution pour les deux instances tests	170

1. Introduction

Au cours de la partie précédente a été introduite une formalisation mathématique pour le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain. Celle-ci ayant été linéarisée, une série d'applications numériques a été proposée. Outre l'illustration du fonctionnement du MILP développé, celle-ci a permis de mettre en évidence la difficulté liée à son utilisation pour la résolution d'instances de grandes tailles.

Compte tenu de ce constat et du caractère industriel de nos travaux nécessitant la résolution d'instances de grandes tailles, a été développée une méthode de résolution approchée dont la présentation constitue l'objectif de ce chapitre. Ainsi, la seconde partie de celui-ci est dédiée à la définition des approches de type heuristique et métaheuristique d'une manière générale mais, également, à la présentation plus spécifique de la méthode communément appelée « Greedy Randomized Adaptive Search Procedure » (GRASP). En effet, comme illustré au sein de la troisième partie, cette dernière méthode a été mise en œuvre afin de résoudre le problème adressé dans le cadre de ce doctorat. Assez logiquement, est introduit au sein de la partie suivante une série d'applications numériques permettant d'évaluer le GRASP ainsi construit tant en termes de qualité des résultats que de temps d'exécution.

Notons qu'afin de faciliter la lecture des différents algorithmes, tout au long de ce chapitre et du suivant, les variables sont écrites en italique à l'inverse des paramètres et fonctions.

2. Définition

2.1. Heuristique – Métaheuristique

De par la difficulté à résoudre, dans des temps adéquats, de nombreux problèmes de plus ou moins grande taille à l'aide de méthodes exactes telle que la programmation linéaire, de nombreuses démarches de résolution approchées ont été développées. Parmi les premières construites se trouvent celles regroupées sous le terme d'heuristiques ; celles-ci pouvant être découpées en deux sous-ensembles à savoir les approches de construction et celles constituant une recherche locale. Comme leur nom l'indique, les premières consistent uniquement à générer une solution réalisable de plus ou moins bonne qualité pour un problème donné. A l'inverse, les secondes développent une approche d'optimisation puisqu'elles ont pour objectif de parcourir le voisinage d'une solution initiale dans le but de trouver un optimum local. Par voisinage d'une solution s^{init} , nous entendons l'ensemble de celles pouvant être atteintes à partir de s^{init} , par la réalisation d'un mouvement simple. Cette dernière opération définit le système de voisinage $V(s)$ adopté où s désigne une solution réalisable quelconque. Ce processus global, caractérisant les heuristiques de type recherche locale peut être résumé par l'intermédiaire de l'Algorithme 1 où $F(x)$ correspond à la fonction objectif de la solution x .

Algorithme 1 : Heuristique_Recherche_Locale**Procédure** Heuristique_Recherche_Locale**Début**

```

1. Construire une solution initiale  $s$ 
2.  $fin \leftarrow \text{FAUX}$ 
3. tant que  $fin = \text{FAUX}$  faire
4.     choisir  $y$  dans  $V^*(s) = \{s^* \in V(s), F(s^*) > F(s)\}$ 
5.     si  $|V^*(s)| \neq 0$  alors
6.          $s \leftarrow y$ 
7.     sinon
8.          $fin \leftarrow \text{VRAI}$ 
9.     fin si
10. fin tant que
11. retourner  $s$ 

```

Fin

Bien que mettant en œuvre une démarche d'optimisation, les heuristiques de type recherche locale aboutissent rarement à des solutions de très bonne qualité. En effet, celles-ci sont très dépendantes de la solution initiale s^{init} considérée, puisque consistant à parcourir son voisinage. Ainsi, elles ont uniquement pour but de définir un optimum local du problème considéré pouvant s'avérer relativement éloigné de la solution optimale. Afin de pallier cette difficulté, d'autres méthodes qualifiées de métaheuristiques ont été développées. Celles-ci, constituant d'avantage un schéma algorithmique adaptable à de nombreuses problématiques, ont pour objectif de parcourir la majeure partie d'un espace de recherche tout en s'affranchissant des minimas locaux et, ceci, dans le but de trouver un optimum global. Bien que partageant un processus global identique, le fonctionnement de ces méthodes ne peut être résumé sous la forme d'un schéma algorithmique simple, comme celui relatif aux heuristiques présenté précédemment (Algorithme 1). En effet, de nombreuses recherches relatives à la définition ainsi qu'à l'adaptation de métaheuristiques existantes ont été réalisées ; celles-ci aboutissant à autant d'approches différentes. Ainsi, nous pouvons mentionner la recherche tabou introduite en premier par ([Glover, 1986]), le recuit simulé ([Kirkpatrick et al., 1983]) ou encore les algorithmes génétiques ([Holland, 1975]).

Assez logiquement compte tenu des éléments indiqués au sein de cette partie, l'utilisation d'une méthode de résolution approchée de type métaheuristique a été préférée à celui d'une heuristique. Plus précisément, comme illustré au sein de la partie suivante, un GRASP a été développé afin de résoudre le problème ASPDRF. Cependant, avant de définir précisément le fonctionnement global de ce type d'approche, il convient de mentionner différents états de l'art relatifs aux métaheuristiques à savoir [Osman and Laporte, 1996], [Osman, 1997] et [Jones et al., 2002].

2.2. Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)

Un nombre relativement important de métaheuristiques a été défini au cours des dernières années. Parmi celles-ci se trouvent les méthodes de types GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) dont une adaptation, pour le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain, est définie dans ce document. Cette méthode a été, pour la première fois, proposée par Feo et Resende ([Feo and Resende, 1989], [Feo and Resende, 1995]) ; des états de l'art associés pouvant être trouvés dans ([Resende and Ribeiro, 2002], [Festa and Resende, 2002]). Une telle approche gloutonne consiste à générer différentes solutions indépendamment les unes des autres ; solutions sur chacune desquelles est appliquée une

recherche locale dans le but de les améliorer. Ainsi, chaque itération de ce processus, illustré sur l'Algorithme 2, génère un maximum local, le but étant de trouver l'extrémum global par la construction d'un grand nombre de solutions initiales (étape de construction, ligne 2).

Algorithme 2 : schéma global de la métaheuristique GRASP

Procédure Heuristique_Recherche_Locale

Début

```

1.  pour  $i = 1$  à  $Nb$  faire
2.       $s \leftarrow$  construction_Solution
3.       $s \leftarrow$  recherche_Locale( $s$ )
4.      si  $F(s) > F(s')$  alors
5.           $s' \leftarrow s$ 
6.      fin si
7.  fin pour
8.  retourner  $s'$ 

```

Fin

Conformément aux éléments précédemment indiqués, la mise en œuvre de cette méthode dans le cadre de nos travaux s'est traduite, notamment, par la génération d'affectations des productions aux usines réalisables ainsi que leur évaluation, ces différents aspects faisant l'objet de la partie suivante.

3. GRASP pour le problème ASPDRF dans un contexte déterministe

3.1. Fonctionnement global de la méthode

3.1.1. Principe de la méthode

Compte tenu des éléments mentionnés dans la partie précédente, le GRASP développé, afin de résoudre le problème ASPDRF, se compose principalement de trois étapes (construction d'une solution, évaluation d'une solution et recherche locale). Cependant, celui-ci ne correspond pas totalement au schéma algorithmique général de l'Algorithme 2. En effet, comme indiqué lors du premier chapitre et repris dans les deux suivants, l'une des particularités de nos travaux est de tenir compte de la notion de solution initiale. Ainsi, préalablement à ces différentes étapes, doit être effectuée une évaluation de l'affectation agrégats produits – usines initiale ; la fonction objectif obtenue constituant une valeur de référence par rapport auxquelles doivent être comparées, ensuite, les différentes solutions générées.

Au-delà de la simple évaluation d'une solution initiale, le GRASP construit présente une autre particularité vis-à-vis du schéma général représenté par l'Algorithme 2. En effet, afin de permettre une accélération des temps de calcul seules les K meilleures solutions parmi l'ensemble des Nb ($K \leq Nb$) générées font l'objet d'une recherche locale. Notons que bien que cette démarche présente l'avantage de réduire le nombre d'itérations de cette dernière méthode, elle suppose que le voisinage d'une solution meilleure qu'une autre a obligatoirement un optimum local de meilleure qualité que celui associé à la seconde, ce qui n'est pas obligatoirement le cas. Cependant, remarquons aussi que dans le cas où K est identique à Nb , cette difficulté ne se présente pas, la métaheuristique développée se ramenant à un simple GRASP. Ce dernier aspect est illustré par l'intermédiaire de l'Algorithme 3 où *liste_Sol* correspond à l'ensemble des K

solutions retenues. Précisons que le processus d'évaluation et de construction des solutions est porté par la fonction « Construction_Evaluation_Solution ».

Algorithme 3 : GRASP modifié pour le problème ASPDRF

Procédure GRASP_Allocation_Dimensionnement

Début

```

1.  Evaluer( $s^{init}$ )
2.  pour  $i = 1$  à  $Nb$  faire
3.     $s \leftarrow$  Construction_Evaluation_Solution
4.    si  $i < K$  alors
5.      ajout_Solution( $s$ , liste_Sol)
6.      trie(liste_Sol)
7.    sinon
8.      si  $F(s) > F(liste\_Sol[K])$  alors
9.        suppression( $K$ , liste_Sol)
10.       ajout_Solution( $s$ , liste_Sol)
11.       trie(liste_Sol)
12.    fin si
13.  fin si
14. fin pour
15. pour  $i = 1$  à  $K$  faire
16.   liste_Sol[ $K$ ]  $\leftarrow$  recherche_Locale(liste_Sol[ $K$ ])
17. fin pour
18. trie(liste_Sol)
19. si  $F(liste\_Sol[1]) > F(s^{init})$  alors
20.   retourner(liste_Sol[1])
21. sinon
22.   retourner( $s^{init}$ )
23. fin si

```

Fin

A travers ce schéma algorithmique et comme indiqué précédemment, nous pouvons noter la présence de différentes fonctions relatives à la construction et l'évaluation d'une solution ainsi qu'à la réalisation d'une recherche locale. Comme mentionné au sein des parties suivantes dédiées à chacune d'entre elles, ces dernières ont fait l'objet d'un découpage en un ensemble de sous-fonctions. Aussi, il convient, afin de faciliter la compréhension du fonctionnement du GRASP, de donner une vision globale de son architecture.

3.1.2. Décomposition de la méthode en divers fonctions

Comme illustré au sein de la partie précédente, le GRASP est composé, principalement, de trois fonctions à savoir une fonction associée à la construction d'une solution (« Construction_Evaluation_Solution »), une au processus d'évaluation (« Evaluer(s) ») et une recherche locale (« Recherche_Locale(s) »). Ces dernières sont elles-mêmes constituées d'autres sous-fonctions mais peuvent également être englobées dans d'autres fonctions. Ceci est par exemple le cas de « Evaluer(s) » qui est à la fois utilisée individuellement afin d'évaluer la qualité de la solution initiale mais également intégrée au sein de la fonction (« Construction_Evaluation_Solution »). L'architecture du GRASP ainsi défini est représentée par l'intermédiaire de l'arbre de la Figure 28.

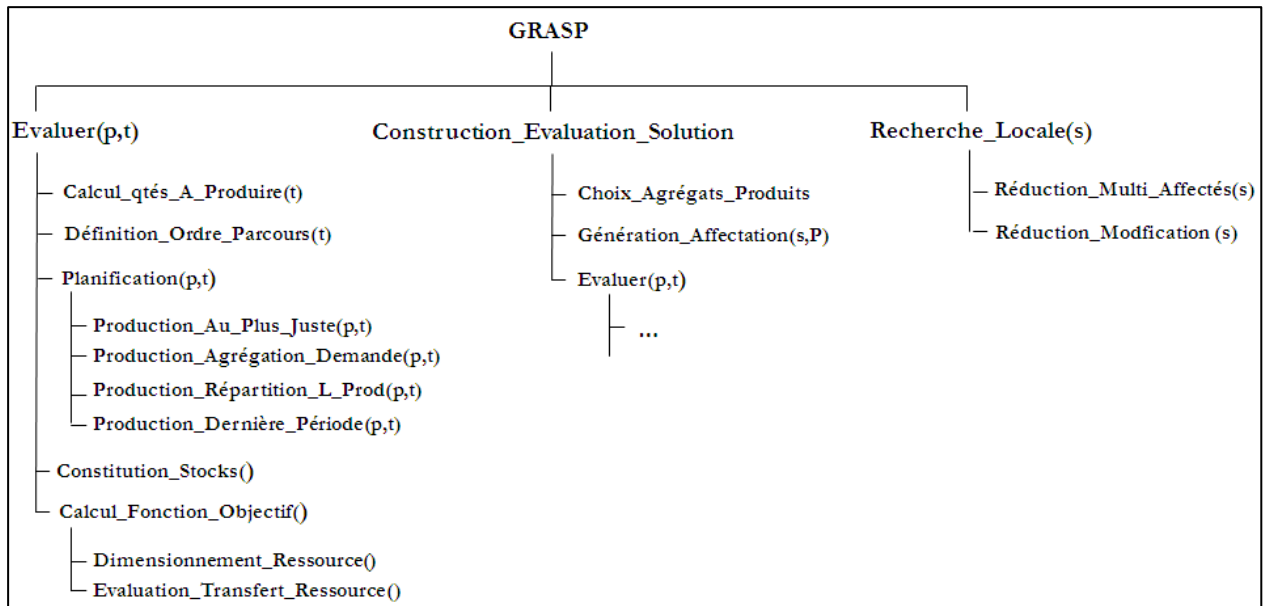


Figure 28 : Décomposition du GRASP en différentes fonction

Ainsi, comme illustré sur cette figure, la fonction « Evaluer » est elle-même constituée de divers sous fonctions à savoir :

- calcul_qtés_A_Produire(t) évaluant la quantité de chaque agrégats produit à fabriquer, lors de la période considérée, au regard des stocks et de la demande ;
- Définition_Ordre_Parcours(t) définissant pour la période courante l'ordre dans lequel doivent être parcourus les agrégats produits afin de réaliser la planification de la production;
- Planification(p, t) effectuant la planification de la production relative à l'agrégat produit p lors de la période t . Celle-ci est elle-même composée de quatre autres sous-fonction (Production_Au_Plus_Juste(p, t), Production_Agrégation_Demande(p, t), Production_Répartition_L_Prod(p, t), Production_Dernière_Période(p, t)) réalisant, à proprement parlé, la planification de la production selon diverses stratégies de programmation expliquées ultérieurement ;
- Constitution_Stocks() cherchant à satisfaire la demande non satisfaite par l'anticipation de la production et donc la constitution de stocks ;
- Calcul_Fonction_Objectif() permettant de calculer la valeur de la fonction objectif à partir, notamment, de la planification de la production réalisée. Elle fait elle-même appel à deux sous-fonctions permettant d'effectuer un dimensionnement des ressources (Dimensionnement_Ressource()) et de comptabiliser les transferts associés (Evaluation_Transfert_Ressource()).

Cette fonction « Evaluer » est elle-même utilisée au sein de « Construction_Evaluation_Solution », permettant la construction et l'évaluation d'une solution, au même titre que les sous-fonctions suivantes :

- Choix_Agrégats_Produits() permettant de déterminer les agrégats produits devant faire l'objet d'un changement d'affectation ;

- Génération_Affectation(s, P) permettant de générer une solution par la réalisation d'un changement d'affectation, vis-à-vis de la solution initiale, pour les produits sélectionnés.

En ce qui concerne la recherche locale (« Recherche_Locale(s) »), celle-ci est constituée de seulement deux sous-fonctions correspondantes à deux stratégies d'amélioration d'une solution différentes, à savoir :

- Réduction_Multi_Affectés(s) visant à rationaliser le nombre d'agrégats produits multi-affectés ;
- Réduction_Modification(s) dont le but est de diminuer le nombre de changements d'affectation vis-à-vis de la configuration initiale tout en garantissant la conservation ou l'amélioration de la valeur de la fonction objectif de la solution courante.

Outre l'aspect explicatif de notre GRASP, cette même Figure 28, présente également l'intérêt de faciliter l'explication, des différentes fonctions, réalisée au sein des parties suivantes.

3.2. Phase de construction d'une solution

3.2.1. Principe général

L'une des caractéristiques de nos travaux est de considérer la notion de configuration initiale se traduisant par une limitation sur le nombre de modifications d'affectation de la production pouvant être réalisées afin de définir une solution alternative. Cet aspect s'est, bien entendu, traduit lors de la définition du processus de construction. Ainsi, celui-ci a été décomposé en deux étapes, à savoir une première correspondante au choix d'un ensemble P d'agrégats produits, devant faire l'objet d'un changement d'affectation, et une seconde consistant à trouver pour ces derniers l'affectation permettant d'obtenir la meilleure fonction objectif possible. Notons que, comme illustré sur l'Algorithme 4, cette dernière phase correspond en réalité à la réalisation d'une recherche locale (lignes 3-10). En effet, elle consiste, pour l'ensemble P choisit, à tester N ($N > 1$) configurations d'affectations dans le but de déterminer la meilleure au regard de la fonction objectif engendrée (lignes 6-8).

Algorithme 4 : Processus global de construction d'une solution

Procédure Construction_Evaluation_Solution

Début

```

1.   $s \leftarrow s^{init}$ 
2.   $P \leftarrow \text{Choix\_Agrégats\_Produits}$ 
3.  pour  $i = 1$  à  $N$  faire
4.     $s \leftarrow \text{Génération\_Affectation}(s, P)$ 
5.     $F(s) \leftarrow \text{Evaluer}(s)$ 
6.    si  $F(s) > F(s^*)$  alors
7.       $s^* \leftarrow s$ 
8.    fin si
9.   $s \leftarrow s^{init}$ 
10. fin pour
11. retourner ( $s^*$ )
```

Fin

Compte tenu des remarques précédentes, il convient de noter que la constitution de l'ensemble P satisfait les différentes contraintes relatives à la prise en compte d'une solution initiale. Plus précisément, comme illustré au sein de la partie suivante, la quantité d'agrégats

produits sélectionnée est inférieure au nombre maximal de changements d'affectations réalisables vis-à-vis de la solution initiale.

3.2.2. Choix des agrégats produits

Conformément aux éléments indiqués lors de la partie précédente, l'une des premières étapes du processus de construction d'une solution correspond au choix d'un ensemble d'agrégats produits P devant faire l'objet d'un changement d'affectation vis-à-vis de la solution initiale. Cette phase nécessite la connaissance de deux paramètres à savoir le nombre « Nb_Max_Chang_Affectation », correspondant au nombre maximum de changements d'affectation pouvant être réalisés vis-à-vis de la solution initiale, ainsi que la liste « liste_Pdt_Modif_All_Poss » des agrégats produits dont l'affectation peut être modifiée. De plus, il convient également de connaître l'ensemble des produits qualifiés de nouveaux pour lesquels, comme indiqué dans la partie 2.4.4 du chapitre 3, le nombre de changements d'affectation n'est pas limité.

Partant de ces différents éléments, le processus de choix des agrégats produits, illustré par l'intermédiaire de l'Algorithme 5 est décomposé en deux étapes à savoir une première phase de détermination du nombre d'éléments « nb_Ag » à sélectionner afin de construire l'ensemble P ainsi qu'une seconde consistant à choisir les « nb_Ag » agrégats produits parmi la liste « liste_Pdt_Modif_All_Poss ». Notons que, de par ce processus, le nombre de changements d'affectation ainsi effectués sera toujours inférieur ou égal au nombre maximum réalisable.

Algorithme 5 : Choix des agrégats produits devant faire l'objet d'un changement d'affectation

Procédure choix_Agrégats_Produits

Début

```

1.   $nb\_Ag \leftarrow$  aléatoire(1, min(Nb_Max_Chang_Affectation,
    liste_Pdt_Modif_All_Poss.size()))
2.   $i \leftarrow 0$ 
3.   $h \leftarrow 0$ 
4.  tant que  $i \leq nb\_Ag$  &&  $h \leq K$  faire
5.     $p \leftarrow$  aléatoire(liste_Pdt_Modif_All_Pos)
6.    si  $p \in$  nouv_Ag_Pdt alors
7.       $h \leftarrow h+1$ 
8.    sinon
9.       $i \leftarrow i+1$ 
10.   fin si
11.   mise-à-jour(liste_Pdt_Modif_All_Pos)
12.    $usine\_Visite\_Possible\_En\_Cours[p] \leftarrow usine\_Visite\_Possible[p]$ 
13.   suppression( $usine\_Visite\_Possible\_En\_Cours[p]$ ,
    affectation_Initiale[p])
14.   ajouter  $p$  à  $P$ 
15. fin tant que
16. retourner ( $P$ )

```

Fin

Afin de bien comprendre ce processus de choix des agrégats produits, il convient de préciser la manière avec laquelle est déterminé le nombre d'agrégats produit à sélectionner (ligne 1). Celui-ci correspond à une valeur tirée aléatoirement entre 1 et le nombre maximal de changements d'affectation possible. Cependant, celui-ci doit également être inférieur à la quantité d'éléments pouvant encore faire l'objet d'une modification de leur affectation, c'est-à-dire au nombre d'agrégats produits contenus dans la liste « liste_Pdt_Modif_All_Poss » d'où la formulation de la ligne 1. Notons que cette variable est mise à jour lors de chaque itération (ligne 12). En

effet, un agrégat produits ne peut être sélectionné qu'un nombre limité de fois afin de faire l'objet d'un changement d'affectation si bien, qu'une fois cette borne atteinte, celui-ci est supprimé de « *liste_Pdt_Modif_All_Poss* ». Soulignons également qu'une procédure permettant de ne pas sélectionner deux fois le même agrégat produit, même si celui-ci est toujours présent au sein de « *liste_Pdt_Modif_All_Poss* » a été définie. Cependant, celle-ci, n'a pas été mentionnée ici par soucis de clarté ainsi que de simplicité.

Un autre élément à remarquer à propos de cet algorithme correspond au nombre réel d'agrégats produits sélectionné. En effet, celui-ci peut, dans les faits, s'avérer supérieur à la borne « *Nb_Max_Chang_Affectation* ». Ceci s'explique par le fait que cette dernière ne porte pas sur les nouveaux agrégats produits, si bien que la sélection de l'un de ces derniers n'est pas comptabilisée comme un changement d'affectation. Ainsi, ligne 4, le critère d'arrêt correspond à la sélection d'un nombre d'agrégats produits « anciens » équivalent à *nb_Ag* ou à celle d'un nombre *K* de nouveaux. Ainsi, le nombre maximal d'agrégats produit potentiellement sélectionnable s'élève à $(nb_Ag + K - 1)$ où *nb_Ag* est inférieur ou égal à « *Nb_Max_Chang_Affectation* » et *K* correspond à une borne sur le nombre total de nouveaux éléments pouvant être simultanément sélectionnés. Notons que l'introduction de cette dernière borne, définie par l'utilisateur, répond à la volonté de limiter le nombre de changements d'affectations prévisionnelles.

Jusqu'à maintenant, aucune mention n'a été faite des lignes 13 et 14. Celles-ci font intervenir trois éléments non encore introduits à savoir « *affectation_Initiale* », « *usine_Visite_Possible* » et « *usine_Visite_Possible_En_Cours* ». Les deux premiers paramètres contiennent, pour chaque agrégat produit, respectivement l(es) usine(s) à laquelle (auxquelles) il est alloué au sein de la solution initiale et l'ensemble des usines ayant au moins une ligne de production capable de le fabriquer. Le troisième, quant à lui, constitue une variable intermédiaire contenant également, pour chaque agrégat produit, la liste des usines auxquelles il peut être alloué, déduction faite de celle(s) au sein de laquelle (desquelles) il est initialement fabriqué. Notons que cette dernière variable n'est pas utilisée au sein de cette fonction permettant la constitution de l'ensemble *P* mais uniquement au sein de celle définissant les affectations de production ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

3.2.3. Génération d'une affectation de la production à partir d'une solution initiale

Conformément aux éléments indiqués lors de la partie précédente, la génération d'une affectation de la production, à partir de la solution initiale, est réalisée par l'intermédiaire d'un changement d'affectation des agrégats produits sélectionnés par la fonction « *choix_Agrégats_Produits* ». Ainsi, ce processus, décrit par l'intermédiaire de l'Algorithme 6, débute par une phase d'initialisation, pendant laquelle les différentes affectations et dimensionnements des ressources des différents agrégats produits sont fixés à une valeur identique à celle de la solution initiale (lignes 1-4).

Dans un second temps, pour chacun des éléments de l'ensemble *P*, est sélectionnée aléatoirement une usine. Notons que ce processus ne consiste pas simplement à en choisir une parmi l'ensemble de celles possibles. En effet, comme indiqué précédemment et illustré par l'intermédiaire de l'Algorithme 4, pour chaque ensemble *P* défini, sont générées différentes configurations d'affectation, la meilleure étant finalement choisie. Ainsi, de par cette logique, le choix d'une usine, pour un agrégat produit de *P*, est tout d'abord réalisé parmi l'ensemble de celles non encore sélectionnées lors d'une itération précédente (i.e *usine_Visite_Possible_En_Cours*). Cependant, le nombre *N* de configurations évaluées pour chaque ensemble *P* pouvant être supérieur à celui des usines au sein desquelles peuvent être fabriqués les agrégats produits, il se

peut que toutes les éventualités aient été testées. Dans ce cas, le choix est réalisé aléatoirement parmi toutes les usines possibles (i.e usine_Visite_Possible) (lignes 9-11). Une fois cette sélection aléatoire réalisée, le nombre de ressources total associé à l'agrégat produit considéré est fixé à une valeur M arbitrairement grande ; le dimensionnement étant réalisé ultérieurement selon un processus décrit dans une des parties suivantes.

Une fois ces changements réalisés pour l'ensemble des éléments de P (lignes 5-14), d'autres modifications consistant à augmenter la quantité d'agrégats produits multi-affectés sont réalisées. En effet, comme indiqué lors de la partie précédente, la quantité de changements d'affectations effective nb_Ag ne peut être supérieure à la borne maximale relative au nombre maximum de changement d'affectations possible $Nb_Max_Chang_Affectation$. Ainsi, dans le cas où celle-ci est strictement inférieure, une phase de diversification de la solution courante est réalisée (lignes 15-26). Celle-ci consiste à profiter de la quantité de changements d'affectation encore réalisable afin d'affecter d'avantage d'agrégats produits à plus d'une usine, tout en respectant le nombre maximum possible. Notons que cette étape d'accroissement de la flexibilité de la solution courante peut paraître inopportune dans la mesure où elle engendre un coût supplémentaire, issu de la multi-affectation de plus d'agrégats produits, sans pour autant garantir l'augmentation de la satisfaction de la demande et, par conséquent, le chiffre d'affaire. Cependant, il n'en est rien. En effet, elle doit être vue dans un processus global où les solutions sélectionnées font l'objet d'une recherche locale qui, comme indiqué ultérieurement, consiste notamment à supprimer les multi-affectations non efficaces. Ainsi, cette phase supplémentaire constitue d'avantage une diversification positive de la solution courante visant à lui apporter d'avantage de flexibilité, qu'une pénalisation. Remarquons que lors de cette étape, les agrégats produits, sélectionnés parmi une liste d'éléments pouvant faire l'objet d'une multi-affectation ($ag_Pdt_Multi_Allouable$), sont affectés à deux usines uniquement et non d'avantage. De plus, afin de satisfaire les différentes contraintes, la quantité d'agrégats produits supplémentaire multi-affectés correspond à une valeur aléatoire inférieure au nombre de changements d'affectation encore réalisable ($Nb_Max_Chang_Affectation - nb_Ag$), au nombre d'agrégats produits pouvant encore être sélectionnés ($ag_Pdt_Multi_Allouable.size()$) ainsi qu'au nombre maximum d'agrégats produits supplémentaires pouvant être multi-affectés ($nb_Max_Multi_Alloués-ag_Pdt_Multi_alloués.size()$) (ligne 15).

Comme illustré précédemment (Algorithme 4), ces différents algorithmes nécessitent un processus d'évaluation des solutions, ceci étant réalisé par une fonction spécifique comme indiqué au sein de la partie suivante.

Algorithme 6 : Génération d'une affectation à partir de la configuration initiale

Procédure Génération_Affectation(s, P)

Début

```

1.  pour  $k=1$  à  $nb\_Ag\_Pdt\_Tot$  faire
2.      affectation[ $k$ ] ← affectation_Initiale[ $k$ ]
3.      ressource_Tot[ $k$ ] ← ressource_Tot_Init[ $k$ ]
4.  fin pour
5.  pour tout  $p \in P$  faire
6.      si  $usine\_Visite\_Possible\_En\_Cours[p].size() > 0$  alors
7.           $u \leftarrow aléatoire(usine\_Visite\_Possible\_En\_Cours[p])$ 
8.          suppression( $u, usine\_Visite\_Possible\_En\_Cours[p]$ )
9.      sinon
10.          $u \leftarrow aléatoire(usine\_Visite\_Possible[p])$ 
11.     fin si
```

```
12.      affectation[p] ← u
13.      ressource_Tot[p] ← M
14.  fin pour
15.  nb_Multi_Affectation ← aléatoire(1, min(Nb_Max_Chang_Affectation -
      nb_Ag, ag_Pdt_Multi_Allouable.size());
      nb_Max_Multi_Alloués - ag_Pdt_Multi_alloués.size())
16.  pour i=1 à nb_Multi_Affectation faire
17.      pbis= aléatoire(ag_Pdt_Multi_Allouable)
18.      suppression(pbis, ag_Pdt_Multi_Allouable)
19.      remise_A_Zero(affectation[pbis])
20.      pour j=1 à 2 faire
21.          u ← aléatoire(usine_Visite_Possible[pbis])
22.          ajout(affectation[pbis], u)
23.      fin pour
24.      ressource_Tot[pbis] ← M
25.      ajout(pbis, ag_Pdt_Multi_alloués)
26.  fin pour
Fin
```

3.3. Evaluation d'une solution

De par la nature du problème adressé, la solution initiale ainsi que celles générées correspondent à une affectation des différents agrégats produits aux usines ainsi qu'un dimensionnement des ressources disponibles. Ces décisions doivent permettre de maximiser le profit du système considéré. Ainsi, outre la prise en compte d'éléments stratégiques tels que les différents coûts de dimensionnement, il convient également de tenir compte des impacts opérationnels. Ainsi, comme indiqué au sein du troisième chapitre, l'évaluation d'une solution passe par la réalisation d'une planification tactique de la production à la maille mensuelle.

3.3.1. Principe général d'évaluation d'une solution

Le processus d'évaluation d'une solution est réalisé par l'intermédiaire d'une planification de la production vis-à-vis d'une demande mensuelle prévisionnelle. Celle-ci est séparée en deux grandes parties elles-mêmes décomposées en sous-parties. Ainsi, comme indiqué sur la l'Algorithme 7 sont distinguées, d'une part, une phase de définition périodique des quantités à produire de chaque agrégat produit (ligne 2) et de détermination de l'ordre de parcours des différentes familles de standardisation (ligne 3) et, d'autre part, une autre relative, à proprement parlé, à la planification de la production (lignes 4-13). Plus précisément, cette dernière étape définit les quantités de chaque agrégat produit à fabriquer sur chaque ligne de production; l'ordre de parcours étant défini lors de la première phase (ligne 2). Notons que, comme expliqué au sein de la partie suivante, ces processus répondent à une logique de programmation de la production visant à maximiser la satisfaction de la demande tout en réduisant les stocks. De plus, précisons que l'ordre de parcours est défini à la maille famille de standardisation, le but étant de planifier simultanément la production de tous les agrégats produits appartenant à la même.

En plus de ces grandes étapes, est également ajoutée une phase de constitution des stocks (ligne 18). En effet, comme illustré ultérieurement, la phase de planification consiste juste à chercher à produire exactement la demande de la période considérée sans chercher à pallier des problèmes capacitaires par une anticipation de la production. Par conséquent, il s'avère nécessaire de mettre en œuvre, à l'issue de ce processus, une démarche de constitution de stocks consistant à profiter des capacités disponibles lors de chaque période afin de satisfaire la demande restante lors des suivantes.

A travers l'Algorithme 7, nous pouvons également constater qu'à chaque période, dès lors qu'un agrégat produit affecté à plus d'une usine est sélectionné, celui-ci est sauvegardé au sein d'un tableau (lignes 7-8) dans le but de ne réaliser sa planification qu'en dernier lieu, c'est-à-dire une fois que la programmation de tous les éléments mono-affectés a été réalisée (lignes 14-16). Cette démarche consiste ainsi à utiliser prioritairement les capacités pour la production des agrégats produits ne pouvant être fabriqués, de par leur affectation, que dans une unique usine avant, ensuite, de considérer les multi-affectés offrant plus de souplesse en termes de programmation. Autrement dit, cette approche présente l'avantage de maximiser l'utilisation de la flexibilité du système en évitant de saturer la capacité de chaque usine avec des agrégats produits pouvant être fabriqués dans plusieurs au dépend de ceux mono-affectés.

Algorithme 7 : Processus d'évaluation d'une solution

Procédure Evaluation(s)

Début

```

1.  pour  $i=1$  à nb_Periode faire
2.      calcul_qtés_A_Produire( $t$ )
3.      ordre_Parcours  $\leftarrow$  définition_Ordre_Parcours( $t$ )
4.      pour  $f=1$  à nb_Famille_Standardisation faire
5.          inter_F  $\leftarrow$  ordre_Parcours( $f$ )
6.          pour tout agrégat produit  $p$  de inter_F faire
7.              si  $p \in ag\_Pdt\_Multi\_alloués$  alors
8.                  ajout( $tab\_Multi, p$ )
9.              sinon
10.                 Planification( $p, t$ )
11.              fin si
12.          fin pour
13.      fin pour
14.      pour tout agrégat produit  $p$  de  $tab\_Multi$  faire
15.          Planification( $p, t$ )
16.      fin pour
17.  fin pour
18.  constitution_Stocks()
19.   $F(s) \leftarrow$  calcul_Fonction_Fitness()
20.  retourner( $F(s)$ )

```

Fin

A travers ces éléments, nous pouvons donc noter la séparation de la phase d'évaluation en différentes sous-étapes, la première d'entre elle, correspondante au calcul des quantités à produire ainsi qu'à la définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation, faisant l'objet de la partie suivante.

3.3.2. Calcul des quantités à produire et définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation

Afin de mener à bien toute opération de planification de la production un paramètre particulier est indispensable à savoir les quantités de chaque agrégat produit à fabriquer, ceci

correspondant à la demande prévisionnelle diminuée des stocks. De plus, il s'avère nécessaire de définir une stratégie de planification établissant une logique de programmation conforme aux objectifs de rentabilité ainsi qu'à la structure du portefeuille produits et du système de production. Dans notre cas, ces deux activités sont assurées par deux fonctions distinctes décrites ci-dessous.

3.3.2.1. Fonction déterminant les quantités à produire de chaque agrégat produit

Dans le cadre d'une planification de la production tenant compte principalement de paramètres stratégiques, le calcul des quantités à produire s'avère relativement simple. En effet, il consiste juste, pour chaque agrégat produits, à établir au regard des stocks le volume manquant afin de satisfaire pleinement la demande de la période considérée.

Algorithme 8 : Processus de calcul des quantités à produire

Procédure Calcul_qtés_A_Produire(t)

Début

```

1.  si  $t=1$  alors
2.      pour tout agrégat produit  $p$  faire
3.           $qte\_A\_Produire[p][t] = \max(0, demande[p] - stock\_Init[p])$ 
4.           $stock[p][t] = \max(0, stock\_Init[p] - demande[p])$ 
5.      fin pour
6.  sinon
7.      pour tout agrégat produit  $p$  faire
8.           $qte\_A\_Produire[p][t] = \max(0, demande[p] - stock[p][t-1] -$ 
               $qte\_Pdtes[p][t])$ 
9.           $stock[p][t] = \max(0, stock[p][t-1] + qte\_Pdtes[p][t] - demande[p])$ 
10.     fin pour
11. fin si

```

Fin

Notons que comme indiqué sur l'Algorithme 8 dans notre cas, ont également été considérées les quantités déjà fabriquées (lignes 8 et 9). En effet, de par le processus de fabrication adopté, explicité ultérieurement, et afin de satisfaire des contraintes relatives au volume minimum à produire, il se peut que lors de la programmation de la production sur une période donnée t , des décisions soient prises concernant $(t+1)$. Ainsi, il convient de tenir compte de ce paramètre lors du calcul des stocks et des quantités à produire afin de ne pas planifier plus de besoin que réellement nécessaire.

Outre la planification à proprement parlé de la production, les quantités à produire sont également utilisées afin de déterminer l'ordre de parcours des différentes familles de standardisation, ce processus faisant l'objet de la partie suivante.

3.3.2.2. Définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation

Afin de mener à bien tout processus de planification d'une manière algorithmique, il s'avère nécessaire de définir un ordre de parcours des différents agrégats produits. La manière la plus simple consiste à opter pour un ordre déterminé aléatoirement. Bien qu'intéressante, cette démarche n'a pas été utilisée ici.

En effet, nous avons choisi d'adopter une approche déterministe dans le but d'introduire une stratégie de planification de la production. Celle-ci répond à une logique pouvant être résumée en trois points à savoir :

- (i) il est préférable de fabriquer prioritairement les produits à plus forte marges ;
- (ii) il est préférable de commencer par programmer la production des éléments les plus contraints ;
- (iii) il est préférable de fabriquer en priorité les agrégats produits pour lesquels le nombre de périodes couvertes par le stock est le plus faible.

Par éléments contraints, nous entendons les familles de standardisation possédant le moins de souplesse en termes de programmation de la production. Ainsi, celles-ci ont été séparées en trois à savoir celles dites « totalement captives », « partiellement captives » et « non captives ». Les premières correspondent aux familles de standardisation composées exclusivement d'agrégats produits captifs, c'est-à-dire ne pouvant être réalisés que sur une unique ligne de production dans chacune des usines auxquelles ils sont alloués. La seconde catégorie est associée, quant à elles, aux familles de standardisation ayant une partie seulement de leurs agrégats produits captifs tandis que la dernière correspond à celles composées exclusivement d'éléments non captifs. Assez logiquement, afin de maximiser la satisfaction de la demande, il convient de tout d'abord commencer par planifier la production des familles de standardisation disposant du moins de souplesse en terme de programmation, c'est-à-dire celles appartenant à la première de ces catégories. Afin de traduire cette nécessité, une variable de pondération, nommée « typologie », a été introduite ; celle-ci étant considérée lors du processus de définition de l'ordre de parcours. Compte tenu des éléments précédemment indiqués, ce paramètre prend sa valeur la plus importante pour les familles de standardisation appartenant à la première catégorie (valeur de 3), sa valeur médiane pour la seconde (valeur de 2) et la moins importante pour la dernière (valeur 1). Notons que, bien entendu, cette classification varie selon les solutions considérées, celles-ci étant dépendantes de l'affectation de la production réalisée. Autrement dit, les variables « typologie » doivent être mises à jour à chaque itération de la méthode ceci étant réalisé par une fonction intitulée « *definition_Type_Affectation* » non décrite.

Comme illustré sur l'Algorithme 9, afin de refléter la stratégie de programmation définie à travers (i)-(iii), à chaque famille de standardisation est affectée une variable « *f_Obj* » traduisant son positionnement vis-à-vis de ces différents points et par rapport à laquelle est déterminé l'ordre de parcours. Ainsi, cet algorithme débute par l'évaluation, pour chaque famille de standardisation, du nombre de périodes couvertes par le stock pour chacun des agrégats produits la composant (lignes 12-15) puis par l'affectation à celle-ci de la valeur la plus faible (variable « *autonomie_Famille* ») (lignes 16-18). Parallèlement est évaluée la demande totale cumulée associée (variable « *qte_Famille* »). En plus de ces éléments, est également introduit un paramètre intitulé « *indice_Marge* » d'autant plus grand que la marge associée aux agrégats produits de la famille de standardisation considérée est importante. Ceux-ci sont ensuite utilisées, au même titre que « *typologie* », afin de déterminer la valeur de la fonction « *f_Obj* » (ligne 20) associée à la famille de standardisation considérée. Une fois ce processus réalisé ces dernières sont triées, au sein de « *ordre_Parcours* » par ordre décroissant de cette même variable « *f_Obj* » (ligne 23).

Ainsi, de par ce processus la stratégie de planification adoptée correspond bien à celle introduite par l'intermédiaire des points (i)-(iii), c'est-à-dire une stratégie privilégiant les agrégats produits à forte marge et débutant par les plus contraints. Notons que l'ordre dans lequel interviennent ces différents paramètres dépend de la valeur des pondérations K , K' et K'' associées. Dans notre cas, celles-ci ont été fixées telles que K'' soit supérieure à K' elle-même plus

grande que K, ceci permettant d'une part de privilégier la satisfaction de la demande des familles de standardisations les plus rentables et d'autres parts de débiter, pour un même niveau de rentabilité, par les plus contraintes. Afin de bien comprendre cette logique de programmation, il convient de rappeler que plus la planification d'un agrégat produit, lors d'une période, est réalisée tôt moins les capacités sont saturées, par la fabrication d'autres éléments, et par conséquent plus sa demande pourra être satisfaite. De plus, rappelons que le fait de calculer les ordres de parcours à la maille famille de standardisation répond à la volonté de programmer simultanément la production des agrégats produits appartenant à la même.

Algorithme 9 : Définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation

Procédure Définition_Ordre_Parcours(*t*)

Début

```

1.  pour chaque famille de standardisation f faire
2.    qte_Famille ← 0
3.    autonomie_Famille ← 0
4.    pour tous les agrégats produits p de f faire
5.      qte_Famille ← qte_Famille + qte_A_Produire[p][t]
6.      si t=0 alors
7.        cumul ← stock_Init[p]
8.      sinon
9.        cumul ← stock[p][t-1]
10.     fin si
11.     nb_Periodes_Stocks ← 0
12.     tant que cumul > 0 && t+ nb_Periodes_Stocks < nb_Periode faire
13.       cumul ← cumul-demande[p][t]+ nb_Periodes_Stocks]
14.       nb_Periodes_Stocks ← nb_Periodes_Stocks+1
15.     fin tant que
16.     si autonomie_Famille > nb_Periodes_Stocks alors
17.       autonomie_Famille ← nb_Periodes_Stocks
18.     fin si
19.   fin pour
20.   f_Obj[f] ←  $K'' \text{indice\_Marge}[f] + K' \text{typologie}[f] + \text{qte\_Famille} -$ 
 $K''' \text{autonomie\_Famille}$ 
21.   ordre_Parcours ← f
22. fin pour
23. trie(ordre_Parcours, f_Obj) //trie de ordre_Parcours selon f_Obj
24. retourner(ordre_Parcours)

```

Fin

Tout comme le processus d'évaluation des quantités à produire, cette fonction relative à la définition de l'ordre de parcours périodique des différents agrégats produits a été uniquement introduite afin de permettre la réalisation de la planification de la production, cette étape faisant l'objet de la partie suivante.

3.3.3. Planification

A la différence de l'affectation des agrégats produits réalisée à la maille usine, la planification de la production est effectuée, quant à elle, à partir des lignes de productions. Plus précisément, elle consiste à déterminer la quantité de chaque agrégat produit à fabriquer sur chaque ligne de production lors de chaque période tout en considérant l'affectation aux usines réalisée ainsi que les différentes contraintes de capacités et de capacités techniques. Afin de mener à bien ce processus, et conformément aux éléments indiqués lors de la partie précédente, une stratégie bien précise a été définie, celle-ci étant illustrée tout au long de cette section.

3.3.3.1. Fonctionnement global du processus de planification

Un des éléments principaux associé à la planification de la production d'un agrégat produit lors d'une période correspond à la détermination de la(des) ligne(s) de production où il devra être fabriqué. Bien entendu, ce choix ne peut se faire que parmi celles installées au sein des usines à laquelle (auxquelles) l'agrégat considéré est affecté. De plus, cette étape doit également respecter l'intégralité des contraintes de capacité et de production introduites lors du troisième chapitre (voir 3.1 et 3.2) à savoir :

- (i) le nombre maximal de familles de standardisation fabricables lors d'une même période sur une même ligne de production ;
- (ii) les capacités maximum ;
- (iii) les pertes de capacités associées à la production de plusieurs familles de standardisation sur une même ligne de production lors d'une même période ;
- (iv) la faisabilité technique (capabilité) ;
- (v) les quantités minimum relatives à tout lancement de production.

Afin de mener à bien cette phase décisionnelle, différentes solutions sont envisageables comme le choix aléatoire des lignes de production. Cependant, bien que simple, cette approche présente, comme précédemment, le désavantage de ne pas permettre la mise en œuvre d'une véritable démarche de planification ; ceci s'avérant relativement important compte tenu des contraintes précédemment évoquées.

Compte tenu de ces éléments, dans notre cas, a été préférée une approche déterministe visant à établir une stratégie d'optimisation de la planification. Le premier paramètre de cette stratégie correspond au fait que les lignes de production sont toujours parcourues dans le même ordre. Afin de comprendre l'avantage offert par cette approche, il convient de le mettre en correspondance avec le fait que l'ordre de parcours est déterminé à la maille famille de standardisation en considérant, notamment, des critères relatifs à l'affectation des agrégats produits les composant (éléments captifs, non captifs...). Ainsi, lors de chaque période, la planification de la production des composants d'une même famille de standardisation sera réalisée successivement en parcourant dans le même ordre les lignes de productions. Ceci aura donc pour conséquence de favoriser le regroupement de la production de ces agrégats produits et ainsi de réduire les pertes de capacités issues de la fabrication de différentes familles de standardisation sur une même ligne de production.

Notons que cette démarche a également pour avantage de permettre une limitation des cas où la capacité d'une ligne de production ne peut être utilisée pour cause d'atteinte du nombre maximum de familles de standardisation réalisable lors d'une même période. A propos de cet aspect, il convient de noter qu'un paramètre non encore introduit jusqu'à présent a également été défini afin de limiter d'autant plus l'apparition de tels phénomènes. Celui-ci correspond à l'attribution, à chaque agrégat produit, d'une taille de campagne minimum, c'est-à-dire d'une quantité minimum à fabriquer lors d'une mise en production. Remarquons que ces paramètres diffèrent des volumes minimum associés aux lignes de production puisqu'ils sont propres à chaque agrégat produit. Leur introduction a pour conséquence de favoriser la fabrication de quantités plus importantes sur les différentes lignes de production et ainsi de limiter la diversité des éléments fabriqués et par conséquent de réduire l'apparition du risque décrit ci-dessus.

Notons, cependant, que ceci a tendance à favoriser la constitution de stocks par la production simultanée de la demande de plusieurs périodes successives.

Afin de compléter ces différents éléments, la démarche de planification a elle-même été décomposée en différentes étapes correspondantes chacune à une logique de programmation de la production différente. Plus précisément, la première consiste à chercher à fabriquer la totalité de la demande, de l'agrégat considéré lors de la période considérée, sur une unique ligne de production. Ceci suppose donc d'en trouver une satisfaisant les différentes contraintes rappelées ci-dessus. Dans le cas contraire, la seconde étape est alors mise en œuvre. Celle-ci consiste, comme précédemment, à chercher une ligne de production capable de fabriquer la totalité de la demande de l'agrégat considéré pour la période courante. Cependant, dans ce cas, cette dernière est agrégée avec celle d'une ou plusieurs période(s) suivante(s) afin de satisfaire les contraintes relatives aux tailles de campagne ainsi que volumes minimums à produire. La réalisation de ces deux stratégies de programmation répond, comme précédemment, à la volonté de limiter au maximum la dispersion de la production des éléments d'une même famille de standardisation entre les différentes lignes de production. Dans le cas, où celles-ci n'auraient pu être mise en œuvre, a lieu la troisième étape de planification consistant à chercher à fabriquer exactement la demande de l'agrégat produit considéré lors de la période courante en répartissant celle-ci sur différentes lignes de production. Les fonctions précédemment introduites ont pour points communs de ne pas être appliquées à la dernière période de l'horizon considérée, celle-ci faisant l'objet d'un processus spécifique s'affranchissant des contraintes de volume minimum.

La succession de ces différentes étapes correspond donc à une logique de programmation visant à réduire l'éclatement de la production ainsi que la constitution des stocks, l'objectif étant de fabriquer exactement la demande de chaque période sous réserves que les contraintes de tailles de campagnes ainsi que de quantités minimum à produire le permettent. Celles-ci sont nommées respectivement « Production_Au_Plus_Juste », « Production_Agrégation_Demande », « Production_Répartition_L_Prod » et « Production_Dernière_Période » au sein de la *Algorithme 10*, schématisant le processus global de planification décrit tout au long de cette partie. Afin de mieux appréhender celui-ci, il convient d'ailleurs désormais de revenir spécifiquement sur chacune des étapes le constituant.

Algorithme 10 : Processus global de planification

Procédure Planification(p, t)

Début

```

1.  Production_Au_Plus_Juste( $p, t$ )
2.  si  $qte\_A\_Produire[p][t] > 0 \ \&\& \ t < nb\_Periode$  alors
3.    Production_Agrégation_Demande( $p, t$ )
4.  fin si
5.  si  $qte\_A\_Produire[p][t] > 0 \ \&\& \ t < nb\_Periode$  alors
6.    Production_Répartition_L_Prod( $p, t$ )
7.  fin si
8.  si  $qte\_A\_Produire[p][t] > 0 \ \&\& \ t = nb\_Periode$  alors
9.    Production_Dernière_Période( $p, t$ )
10. fin si
11.  $stock[p][t] \leftarrow \max(0, stock[p][t-1] + qte\_Pdtes[p][t] - demande[p][t])$ 

```

Fin

3.3.3.2. Planification au plus juste

Le processus de planification qualifié de « au plus juste » s'avère être le plus restrictif. Sa réalisation suppose en effet que la totalité des contraintes inhérentes à la mise en fabrication d'un agrégat produit sur une ligne de production soit satisfaite. L'évaluation de ces dernières se

retrouve donc logiquement sur l'Algorithme 11, illustrant le schéma algorithmique de cette fonction. Ainsi, de par les lignes 1-6 sont parcourues l'ensemble des lignes de production des usines auxquelles l'agrégat produit p est alloué ; un critère d'arrêt, correspondant à la fabrication de l'intégralité de la demande associée pour la période courante t , étant introduit. Ensuite, est évaluée la perte de capacité qui serait engendré dans le cas où p serait fabriqué sur la ligne de production considérée (lignes 8-12). Pour se faire, est utilisée une variable *famille_Pdte* $[l][f][t]$ valant 1 dans le cas où un élément de la même famille que p (i.e la famille f) a déjà été fabriqué sur la ligne de production considérée lors de la période t . Si tel est le cas ou que la ligne de production considérée n'a encore fabriqué aucun élément lors de la période courante (*prod_LP* $[l][t]$ est nulle) alors la perte de capacité, symbolisée par la variable *diminution_Capa_Temp* engendrée est nulle tandis que dans le cas contraire celle-ci prend la valeur p_Capa . Les lignes 13 à 17 permettent, quant à elles, d'évaluer la quantité maximale *inter_Prod* de p pouvant être fabriquée. Celle-ci est nulle si aucune ressource relative à p n'est allouée à l'usine considérée (*ressource_Usine* $[u][p][t]=0$) et que la quantité de celles non encore affectées (*ressources_Restantes* $[p][t]$) est inférieure au nombre minimum de ressources devant être installées sur la ligne de production en question (*ressources_Min* $[l]$). Si tel n'est pas le cas, alors cette valeur correspond au minimum entre la capacité issue des ressources disponibles (d'ors et déjà allouées à l'usine ou non) et les capacités non utilisées de la ligne de production diminuées de la perte de capacités éventuelle.

Assez logiquement, cette valeur *inter_Prod* est ensuite utilisée, ligne 18, afin de vérifier que celle-ci est bien supérieure ou égale à la quantité de p à fabriquer (*qte_A_Produire* $[p][t]$) mais également à la taille de campagne minimum associée (*t_camp* $[p]$) ainsi qu'au volume minimum à produire relatif à la ligne de production considérée (*vol_min* $[l]$). De plus, est également vérifié que cette dernière a les capacités techniques suffisantes (*capabilité* $[p][l]=1$) et que le nombre maximal de familles de standardisation réalisables lors d'une même période soit respecté. Dans le cas où l'ensemble de ces contraintes est satisfait, la production d'une quantité équivalente à *qte_A_Produire* $[p][t]$ est planifiée tandis que les différentes variables de capacités ainsi que de ressources disponibles sont mises à jour. Notons que cette dernière étape (lignes 19–40) se traduit également par l'affectation éventuelle de ressources supplémentaires, spécifiques à p , à l'usine considérée lors de la période courante.

Si, à la sortie de cette fonction, la quantité à produire de l'agrégat produit considéré est encore positive c'est qu'aucune ligne de production satisfaisant l'intégralité des contraintes n'a pu être trouvée. Dans ce cas, comme mentionné précédemment, un second processus de planification est mis en œuvre, celui-ci étant présenté dans le paragraphe suivant.

Algorithme 11 : Processus de planification « au plus juste »**Procédure** Production_Au_Plus_Juste(p,t)**Début**

```

1.  k ← 0
2.  tant que k < affectation[p].size() && qtés_A_Produire[p][t] > 0 faire
3.    u ← affectation[p]
4.    f ← famille[p]
5.    h ← 0
6.    tant que h < composition_Usine[u].size() && qtés_A_Produire[p][t] > 0
7.      l ← composition_Usine[u][h]
8.      si famille_Pdte[l][f][t] = 1 OU prod_LP[l][t] = 0 alors
9.        diminution_Capa_Temp ← 0
10.     sinon
11.       diminution_Capa_Temp ← p_Capa
12.     fin si
13.     si ressource_Usine[u][p][t] = 0 && ressources_Restantes[p][t]
                                     < ressources_Min[l] alors
14.       inter_Prod ← 0
15.     sinon
16.       inter_Prod ← min(ressources_Restantes[p][t] x prod_Ressource[p] +
                           capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t];
                           capa_L_Prod[l][t] - diminution_Capa_Temp)
20.    fin si
21.    si inter_Prod > max(qte_A_Produire[p][t], t_camp[p], vol_min[l])
        && capacité[p][l] = 1 && (famille_Pdte[f][t] = 1 OU
        nb_Famille[l][t] < nb_Max_Famille[l]) alors
23.      capa_L_Prod[l][t] ← capa_L_Prod[l][t] - diminution_Capa_Temp -
                                   qte_A_Produire[p][t]
24.      prod_LP[l][t] ← prod_LP[l][t] + qte_A_Produire[p][t]
25.      qte_Pdtes[p][t] ← qte_Pdtes[p][t] + qte_A_Produire[p][t]
26.      qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t] ← qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t] +
                                   qte_A_Produire[p][t]
27.      si famille_Pdte[f][t] = 0 alors
28.        famille_Pdte[f][t] = 1
29.        nb_Famille[l][t] ← nb_Famille[l][t] + 1
30.      fin si
31.      si ressource_Usine[u][p][t] = 0 alors
32.        ressource_Usine[u][p][t] ← min(ressources_Min[l],
                                           qte_A_Produire[p][t] / prod_R[p])
33.        ressources_Restantes[p][t] ← ressources_Restantes[p][t] -
                                           ressource_Usine[u][p][t]
34.        capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t] ←
           ressource_Usine[u][p][t] x prod_R[p] - qte_A_Produire[p][t]
35.      sinon
36.        ajout ← (qte_A_Produire[p][t] -
                  capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t]) / prod_R[p]
37.        ressources_Restantes[p][t] ← ressources_Restantes[p][t] -
                                           ajout
38.        ressource_Usine[u][p][t] ← ressource_Usine[u][p][t] + ajout
        capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t] ← ajout x prod_R[p]
        - qte_A_Produire[p][t]
39.      fin si
40.      qte_A_Produire[p][t] ← 0
41.    fin si
42.    h ← h + 1
43.  fin tant que
44.  k → k + 1
45. fin tant que
Fin

```

3.3.3.3. Planification par agrégation

Le second processus de planification étant similaire au précédent, nous ne présenterons pas ici l'algorithme détaillé associé, le lecteur intéressé pouvant le consulter en annexe. Cependant, il convient de préciser qu'à la différence de celui présenté sur l'Algorithme 11, l'algorithme associé à ce second processus de planification, présente la particularité de permettre l'agrégation de la demande du mois considéré avec celles des périodes suivantes et, ceci, dans le but de satisfaire les contraintes de taille de campagne ainsi que de quantités minimum à produire.

Compte tenu de ces éléments, les principales différences algorithmiques correspondent aux conditions relatives à la mise en fabrication d'un agrégat produit p sur une ligne de production l . Ainsi, contrairement à l'Algorithme 11 (ligne 18), il n'est plus imposé de satisfaire les contraintes de tailles de campagnes ainsi que de volume minimum à produire propre aux lignes de production. Par contre, ces restrictions sont considérées par la suite puisque la demande de la période courante pour l'agrégat produit p considéré est agrégée avec celles des périodes suivantes jusqu'à satisfaire ces mêmes contraintes. Ainsi, à l'issue de cette opération, la quantité à fabriquer ne correspond plus à $qte_A_Produire[p][t]$ mais à une valeur $prod$ satisfaisant d'une part les contraintes de taille de campagne associée à p et d'autre part le volume minimum relatif à la ligne de production considérée.

Au-delà de la simple modification de la quantité à produire, l'algorithme utilisé se traduit également par un changement du processus de planification. Ainsi, dans le cas où cette nouvelle quantité à produire ne peut être fabriquée lors d'une unique période sur la ligne de production considérée, sa production peut être planifiée sur la période courante t ainsi que la suivante $(t+1)$. Remarquons que malgré cet étalement de la production, la quantité produite lors de la période courante t sera au moins équivalente à la demande de la même période ; une des conditions de réalisation de ces opérations étant la disposition, en t , de capacités supérieures à $qte_A_Produire[p][t]$.

A travers ces différents éléments, nous pouvons noter le fait que ce processus s'avère moins restrictif que le précédent. Cette dégressivité se ressent également lorsque l'on s'intéresse à la troisième politique de programmation de la production, celle-ci faisant l'objet de la partie suivante.

3.3.3.4. Planification par répartition de la production

Conformément à l'Algorithme 10 représentant le processus global de planification, cette troisième étape est atteinte seulement si $qte_A_Produire[p][t]$ est positive c'est-à-dire si les contraintes relatives au second processus de planification (plus permissif que le premier) n'ont pu être satisfaites simultanément. Compte tenu de ces dernières, cela signifie qu'aucune ligne de production n'a suffisamment de capacités afin de fabriquer entièrement $qte_A_Produire[p][t]$ lors de la période courante t . Partant de ce constat, le troisième processus de planification consiste à répartir la fabrication de $qte_A_Produire[p][t]$ tout en respectant les différentes restrictions relatives aux capacités, aux ressources, aux tailles de campagnes ainsi qu'aux quantités minimums à produire propres aux lignes de production.

Compte tenu de ces prérogatives, l'algorithme relatif à cette troisième étape de planification, visible en annexe, diffère du premier par le retrait de la contrainte imposant de disposer de capacités supérieures à la quantité à produire lors de la période courante ($qte_A_Produire[p][t]$) (ligne 18 de l'Algorithme 11) et par l'ajout d'un processus de mise à jour de ces dernières au fur et à mesure de la programmation de la production.

Jusqu'à maintenant, les différentes procédures de planifications introduites ont concerné l'intégralité des périodes exclusion faite de la dernière. En effet, à celle-ci est dédiée une fonction spécifique introduite ci-dessous.

3.3.3.5. Cas spécifique de la dernière période

Afin de faciliter l'exploitation des résultats et s'affranchir des contraintes « de bords » inhérentes à la prise en compte d'un horizon de temps fini, un certain nombre de contraintes ont été relâchées dans le cadre de la dernière période. Ceci concerne principalement celles relatives aux tailles de campagnes ainsi que volumes minimum à produire ; aucune agrégation de la demande des périodes au-delà de la dernière ne pouvant être alors réalisée afin de les satisfaire. Hormis, ces éléments, ce processus se rapprochant beaucoup de celui introduit dans la partie précédente, nous ne présenterons pas ici l'algorithme associé.

Le processus de planification constitue l'un des éléments majeurs de l'évaluation d'une solution. Cependant, celui-ci visant uniquement à fabriquer chaque mois la demande de la période courante, en considérant éventuellement les suivantes afin de satisfaire les contraintes de tailles de campagne ainsi que de volumes minimum associés aux lignes de production, il convient également de procéder à une étape de constitution des stocks afin d'absorber la demande non satisfaite par l'utilisation des capacités encore disponibles.

3.3.4. Phase de constitution des stocks

Comme son nom l'indique, l'étape de constitution des stocks a pour objectif, partant d'une planification donnée, de satisfaire la demande restante par une anticipation de la production à l'aide des capacités disponibles. Ce processus, consiste à considérer successivement les différentes périodes et pour chacune d'elles les différents agrégats produits. Plus précisément, ces derniers sont, à chaque itération, classés selon le critère de demande non satisfaite décroissante avant d'être parcourus dans l'ordre ainsi défini. Pour chacun d'eux, dans le cas où la totalité de la demande n'a pu être totalement satisfaite lors de la période courante, démarre une phase consistant à rechercher en amont des capacités disponibles afin de combler cet excédent.

Cette recherche est séparée en deux sous-étapes. La première d'entre elles consiste à rechercher des capacités encore disponibles au sein des lignes de production fabriquant déjà l'agrégat produit considéré en amont de la période courante. Ceci présente en effet l'avantage de réduire au maximum la dispersion de la production des agrégats produits appartenant à une même famille de standardisation. De plus, cela garantit de fait la satisfaction des contraintes de tailles de campagnes minimum, de volumes minimum à fabriquer ainsi que de nombre maximum de familles de standardisation réalisables sur une même ligne de production lors d'une même période. Bien entendu, dans ce contexte, toutes les autres contraintes, telles que les capacités ou encore la gestion des ressources disponibles, sont considérées tandis que la valeur des stocks est mise à jour en fonction des décisions de programmation de la production prises.

Dans le cas où, malgré cette recherche, la totalité de la demande n'a pu être satisfaite par la constitution de stocks, un processus similaire est réalisé, pour le même agrégat produit, en considérant, cette fois-ci, les lignes de production où il n'est pas fabriqué lors de la période en question. Notons qu'à la différence de l'étape précédente, dans ce cas, la totalité des contraintes doivent être considérées. Cependant, précisons que la notion de taille de campagne n'est ici par prise en compte. Ceci permet de faciliter l'obtention de résultats sans pour autant affecter la faisabilité des solutions obtenues. En effet, ces contraintes de tailles de campagne sont

uniquement destinées à limiter la saturation des lignes de production vis-à-vis du nombre maximal de familles de standardisation pouvant y être fabriquées et ne constituent pas une réelle contrainte propre à la production. Par conséquent, le fait de pas les prendre en compte ne conduit aucunement à des solutions non réalisables.

Une fois réalisée pour tous les agrégats produits, cette opération est réitérée pour la période suivante jusqu'à atteindre la fin de l'horizon. Ceci met en évidence un des avantages de cette approche à savoir le fait qu'elle permet d'utiliser prioritairement les capacités afin de satisfaire la demande de périodes relativement proches. En effet, il aurait pu être préféré de parcourir chaque agrégat produit et pour chacun d'eux de considérer l'intégralité des périodes. Ceci aurait eu pour conséquences de favoriser certains d'entre eux mais surtout d'utiliser des capacités afin de satisfaire des demandes exprimées plusieurs périodes plus tard. Ceci provoquerait ainsi l'apparition de stocks sur un horizon conséquent et, ce, alors que ces mêmes capacités pourraient être consacrées à la constitution de stocks, pour un autre agrégat produit, afin de satisfaire une demande pour une période nettement plus proche.

Notons que toujours dans le souci de limiter la constitution des stocks un élément `nb_Periode_stock_Max` a été introduit. Celui-ci, constituant un paramètre d'entrée, permet de limiter le nombre de périodes de stocks. En effet, il est utilisé afin d'interdire la planification d'une production dans le but de satisfaire une demande située plus de `nb_Periode_stock_Max` périodes plus tard. A ce titre, il constitue un élément de paramétrage de la métaheuristique destiné à favoriser plus ou moins la satisfaction de la demande au dépend des coûts de stockage et vice et versa.

De par les différents éléments indiqués jusqu'à présent, nous pouvons noter la relative complexité de cette procédure de constitution des stocks. Aussi, en plus de celui visible en annexe, un algorithme simplifiée de ce processus a été introduit (Algorithme 12) afin de résumer succinctement les différents paramètres indiqués au sein de cette partie.

Algorithme 12 : Algorithme de génération des stocks simplifié

Procédure `génération_Stocks()`

Début

1. **pour** $t=0$ à `nb_periode` **faire**
2. choisir un agrégat produit p par critère de demande non satisfaite en t décroissante
3. $t^{bis} \leftarrow t$
3. **tant que** la demande de p en t n'est pas satisfaite et $t^{bis} > 0$ **faire**
4. chercher des capacités disponibles sur les lignes de production fabricant p en t^{bis}
5. chercher des capacités disponibles sur les lignes de production ne fabricant pas p en t^{bis}
6. $t^{bis} \leftarrow t^{bis} - 1$
7. **fin tant que**

Fin

Cette phase de constitution de stocks constitue donc un complément au processus de planification précédemment introduit. A l'issue de ces deux étapes, correspondantes à l'évaluation de la solution considérée, il convient de calculer la valeur de la fonction objectif associée. Celle-ci, faisant l'objet des paragraphes suivants, constitue en effet l'unique indicateur direct de la qualité d'une solution

3.4. Calcul de la fonction objectif – dimensionnement des ressources

Comme indiqué lors de son introduction au sein de la partie 2.6 du chapitre 3, la fonction objectif est composée de trois indicateurs principaux, à savoir le chiffre d'affaire, les coûts opérationnels ainsi que les coûts liés à la construction du système de production de la Supply Chain considérée. Ces derniers correspondent à différents facteurs tel que celui relatif à l'achat des ressources dont l'évaluation nécessite l'introduction d'une fonction spécifique.

3.4.1. Dimensionnement des ressources

Lors de la présentation de la fonction «generation_Affectation» a été indiqué le fait que pour tous les agrégats produits subissant un changement quelconque d'affectation, le nombre de leur ressource total est fixé à une valeur M arbitrairement grande. Ceci constitue l'une des « astuces » du processus de dimensionnement. En effet, celui-ci consiste à définir, à postériori, le nombre de ressources nécessaire à chaque agrégat produit ayant subi un changement d'affectation. Autrement dit, lors de la planification, pour ces derniers le nombre de ressources disponibles ne constitue pas un critère limitant mais est défini, ensuite, en fonction de la programmation de la production réalisée. Afin de bien comprendre ce processus, il convient de rappeler que pour les anciens agrégats produits ne faisant pas l'objet d'un quelconque changement d'affectation, la valeur initiale est conservée.

Algorithme 13 : Dimensionnement des ressources et évaluation des coûts associés

Procédure Dimensionnement_Ressource(ressource_Tot)

Début

```

1.  coût_Ressource ← 0
2.  pour p de 1 à nb_Ag_Pdt_Tot faire
3.    si ressource_Tot[p] = M alors
4.      ressource_Max ← 0
5.      pour t=1 à nb_Période faire
6.        ressources_Période ← 0
7.        pour u=1 à affectation[p].size() faire
8.          usine ← affectation[p][u]
9.          pour h=1 à composition_Usine[u].size() faire
10.           l ← composition_Usine[u][h]
11.           si qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t] > 0 alors
12.             ressources_Période ← ressources_Période +
               max(qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t]/prod_R[p]; qte_Min[l])
13.           fin si
14.         fin pour
15.       fin pour
16.       si ressource_Max < ressources_Période alors
17.         ressource_Max ← ressources_Période
18.       fin si
19.     fin pour
20.     ressource_Tot[p] ← ressource_Max
21.   fin si
22.   coût_Ressource ← coût_Ressource + ressource_Tot[p] ×
23.                                     coût_achat_Ressource[p]
24. fin pour
25. retourner(coût_Ressource)

```

Fin

Dans ce contexte, la fonction de dimensionnement décrite par l'intermédiaire de l'Algorithme 13, consiste à parcourir l'ensemble des agrégats produits et à procéder au dimensionnement de leur ressource dans le cas où le nombre total disponible est égal à M (ligne 3). Pour ce faire, à chaque période est évaluée la quantité totale nécessaire en fonction du volume des productions associé, tout en tenant compte de la contrainte de nombre minimum à installer sur les lignes de production afin de pouvoir procéder à tout lancement de fabrication (ligne 12 où $prod_R[p]$ correspond au nombre d'agrégats de type p fabriqués pendant une période à l'aide d'une unique ressource). De plus, tout au long du parcours des différentes périodes, la quantité de ressource nécessaire la plus importante est sauvegardée (lignes 16-18), celle-ci correspondante finalement au dimensionnement associé à l'agrégat produit considéré (ligne 20).

Notons que cette fonction a également pour but de calculer le coût représenté par la possession des différentes ressources, tous agrégats produits confondus. Ceci est réalisé par l'intermédiaire de la variable *coût_Ressource* dont la valeur est calculée ligne 22. Cette fonction n'est pas la seule à être utilisée au sein de celle calculant la valeur de la fonction objectif associée à la solution courante ; ceci étant également le cas de celle dédiée à l'évaluation du nombre de transferts de ressources réalisés introduite au sein de la section suivante.

3.4.2. Evaluation des transferts de ressource

L'évaluation du transfert des ressources constitue un point délicat du processus de calcul de la fonction objectif. Ceci provient du fait qu'il peut prêter à interprétation. En effet, de par l'algorithme de planification adopté, les ressources sont affectées aux différentes usines seulement lorsqu'elles sont indispensables. Ainsi, il peut arriver, lors de certaines périodes, qu'une partie de celles-ci ne soient pas attribuées. Par conséquent, il devient nécessaire de les allouer à une usine lors de chaque période. Cependant, selon l'affectation choisie le nombre total de transferts ne sera pas le même ; ceci impactant d'autant la valeur de la fonction objectif associée à la solution considérée. Afin de mieux appréhender cette difficulté, considérons l'exemple de la Figure 29. Celui-ci représente le cas d'un agrégat produit pour lequel le nombre de ressources total disponible s'élève à 10 et fabriqué au sein de deux usines U_1 et U_2 . Pour chacune d'elles, est indiqué (partie droite) le nombre de ressources nécessaire lors de chacune des 4 périodes considérées. Compte tenu de ces éléments ; nous pouvons noter que lors de la première période une ressource n'est pas allouée (en effet, le nombre total de ressources nécessaires à la production est de $3+6=9$ alors que le nombre total disponible est de 10). Dans le cas où celle-ci serait affectée à la première usine (configuration du milieu) un unique transfert aurait lieu tandis que si elle était associée à la seconde, ce nombre s'élèverait à deux (configuration droite).

U ₁	U ₂	U ₁	U ₂	U ₁	U ₂
3	6	3 / 0	6 / 1	3 / 0	6 / 1
3	3	3 / 0	3 / 4	3 / 0	3 / 4
4	5	4 / 0	5 / 1	4 / 0	5 / 1
6	4	6 / 0	4 / 0	6 / 0	4 / 0
<hr/> Ressource initialement non affectée : 1		<hr/> Transfert : 1		<hr/> Transferts : 2	
<div> Ressources utilisées / Ressources non utilisées </div>					
<div> ↙ Transferts </div>					

Figure 29 : Exemple d'affectations ressources usines

Ce court exemple, volontairement simple, illustre bien la difficulté algorithmique liée à l'évaluation du nombre de transferts de ressources et, plus précisément, à celui de l'affectation de celles non attribuées lors du processus de planification. Afin de réaliser ceci d'une manière optimale, c'est-à-dire en minimisant les transferts réalisés, ce processus d'évaluation a été modélisé sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal. Comme expliqué d'une manière plus détaillée dans le chapitre suivant, ceci correspond à un graphe reliant un nœud source à un nœud puits par l'intermédiaire d'un ensemble d'autres sommets joints entre eux par différents arcs. A chacun de ces derniers sont affectés une capacité maximale ainsi qu'un coût par unité de flot y circulant. Dans ce contexte, l'objectif est alors de trouver la configuration permettant de faire circuler le flot le plus important possible entre la source et le puits tout en minimisant les coûts associés, le tout en considérant les capacités des arcs. Notons, qu'en plus de ces différentes contraintes, est également imposé le fait que la somme des flots arrivant à un sommet soit équivalente à la somme de ceux en partant, exclusion faite de la source et du puits.

Avant d'expliquer le processus de modélisation adopté, il convient de rappeler que la problématique de transferts de ressources porte uniquement sur les agrégats produit multi-affectés. Ainsi, pour chacun de ces derniers a été introduit un graphe flot maximum à coût minimum constitué, notamment, d'une source S ainsi que d'un autre nœud fictif F , reliés par l'intermédiaire d'un arc ayant, pour capacité maximale, le nombre total de ressources associées à l'agrégat produit p considéré et un coût unitaire nul. Ensuite, ce même nœud fictif F a été relié, par le biais d'arcs de capacités infinies ainsi que de coûts nuls, à différents groupes de sommets représentant le besoin, en termes de ressources, des différentes usines lors de la première période. Plus précisément, à chacun de ces groupes a été associé deux nœuds S_{up1} et S'_{up1} reliés par le biais d'un arc de coût nul et de capacité maximale équivalente au besoin, en termes de ressources, de l'usine u représentée. De par cette modélisation, illustrée par l'intermédiaire de la Figure 30 pour un cas à deux usines, et compte tenu du fait que la somme des ressources utilisées lors d'une période au sein des différentes usines est inférieure ou égal au nombre total disponible, le flot maximal pouvant circuler sur l'arc (S, F) correspond à cette première valeur. Notons que cette approche ne modélise que la première période. Afin de tenir compte de l'intégralité de ces dernières, un groupe similaire a été introduit pour chacune d'elles et chaque usine. Dans ce contexte, l'intégralité des sommets de type « S_{up1} » et « S'_{up1} », ont été reliés à l'ensemble de ceux de

type « $S_{u'p_{t+1}}$ » (u' différent ou égal à u) de la période suivante. Notons que ceux associés à la dernière ont, quant à eux, été joints à un sommet supplémentaire, en l'occurrence le puits P ; ceci étant illustré par l'intermédiaire de la Figure 31 représentant le cas d'un agrégat produit p fabriqué au sein de deux usines u et u' lors de trois périodes.

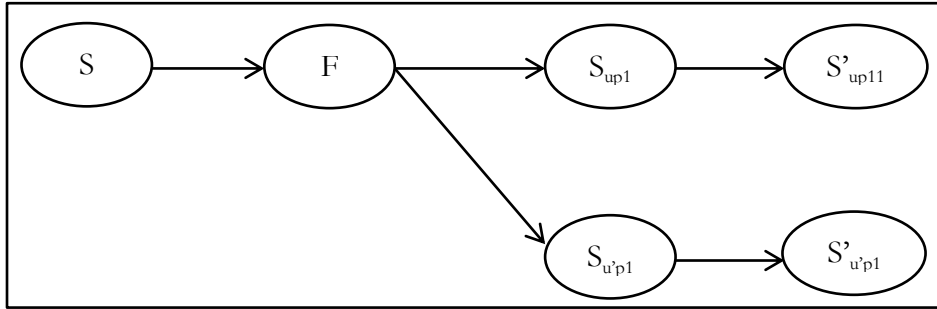


Figure 30 : Exemple d'affectations ressources usines

Jusqu'à maintenant aucune mention n'a été faite des capacités des nouveaux éléments introduits. Ainsi, hormis celles des arcs reliant deux sommets de type « S_{up_t} » et « S'_{up_t} », associés à la même période et à la même usine, ayant comme indiqué précédemment une capacité équivalente à celle du besoin en ressources de cette dernière, elles ont toutes été fixées à une valeur infinie. Dans ce contexte, le flot maximal pouvant circuler dans le graphe correspond exactement au nombre total de ressources disponibles c'est-à-dire à la capacité maximale de l'arc reliant les sommets S et F , celui-ci constituant le « goulot » du graphe. Bien entendu, cette valeur maximale peut être atteinte par différentes configurations. Cependant, selon les arcs utilisés, la solution n'aura pas la même signification. Ainsi, d'une manière générale, tout arc liant un sommet associé à une usine u lors d'une période t à un autre associé à une usine u' ($u' \neq u$) en $(t+1)$ représentera un transfert de ressources tandis que ceux de types $(S_{up_t}, S_{up_{t+1}})$ ou $(S'_{up_t}, S'_{up_{t+1}})$ correspondront à la conservation des ressources au sein d'une même usine. Rappelons également que les arcs (S_{up_t}, S'_{up_t}) représentent, quant à eux, le besoin en terme de ressource de l'usine u lors de la période t .

Maintenant que ces différents éléments ont été introduits, il convient de rappeler l'objectif de la modélisation ainsi définie, à savoir l'affectation lors de chaque période des ressources non allouées tout en minimisant le nombre total de transferts réalisés. Autrement dit, l'objectif est de maximiser l'utilisation des arcs de type $(S_{up_t}, S_{up_{t+1}})$ et $(S'_{up_t}, S'_{up_{t+1}})$ au dépend de ceux reliant deux sommets associés à deux usines différentes et, ceci, tout en saturant ceux de type (S_{up_t}, S'_{up_t}) dans le but de garantir la présence du nombre de ressources nécessaire à la production. Afin de parvenir à cet objectif, des coûts différents ont été associés aux différents arcs. Plus précisément, ceux de type (S_{up_t}, S'_{up_t}) et $(S'_{up_t}, S_{up_{t+1}})$ se sont vus affecter un coût unitaire nul, ceux de types $(S_{up_t}, S_{up_{t+1}})$ un coût positif C et ceux reliant deux sommets représentant des usines différentes lors de deux périodes successives un autre C' tel que $C' > C$. Ainsi, l'objectif étant de trouver le flot maximal pouvant circuler dans le graphe à coût minimum, la résolution de celui-ci se traduit par une utilisation prioritaire des arcs (S_{up_t}, S'_{up_t}) et $(S'_{up_t}, S_{up_{t+1}})$, ceci garantissant une affectation de ressources suffisante à la réalisation de la production dans chaque usine. Cependant, ces arcs étant limités en termes de capacités, afin de faire circuler un flot équivalent au nombre total de ressources disponibles, dans un second temps seront utilisés ceux de types $(S_{up_t}, S_{up_{t+1}})$ et enfin ceux symbolisant des transferts de ressources, à savoir les arcs reliant des sommets représentant des usines différentes lors de deux périodes successives.

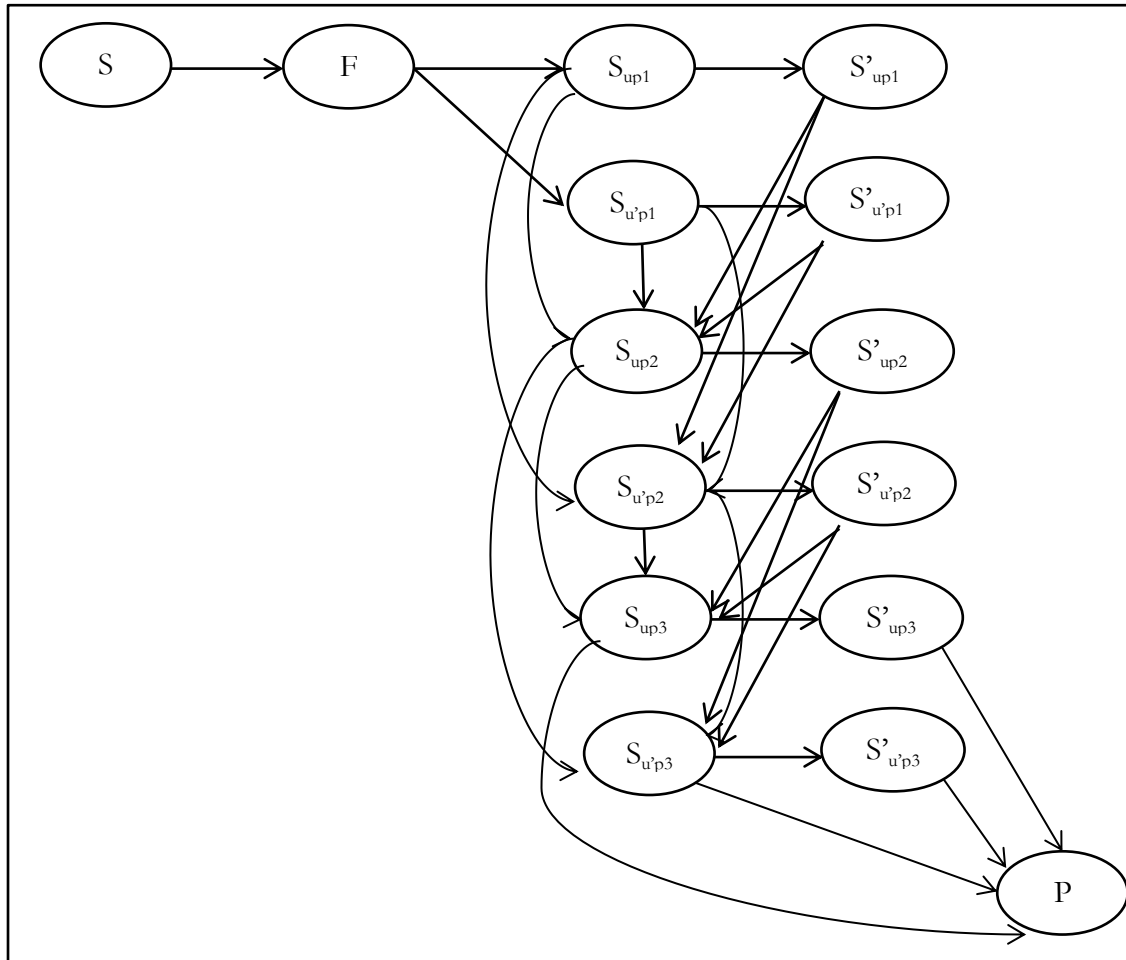


Figure 31 : Graphe flot maximum à coût minimum pour l'évaluation des transferts de ressources associées à un agrégat produit p affecté à deux usines

Ainsi, de par la résolution de ce graphe, est obtenue une affectation des ressources aux différentes usines lors de chaque période minimisant les transferts de ressources. Notons d'ailleurs, qu'afin de comptabiliser ces derniers, il suffit de sommer les valeurs des flots circulant sur des arcs reliant des sommets associés à des usines différentes. A ce propos, il convient de préciser que ce modèle est résolu à l'aide d'un algorithme de type Busacker et Gowen ; une telle démarche permettant d'obtenir une solution optimale en un temps relativement court (pour plus d'informations voir [Ahuja et al., 1993]).

De par cette approche, l'évaluation du nombre total de transferts de ressources consiste donc à mettre en œuvre cette modélisation sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimum pour chaque agrégat produit multiaffecté ; la valeur finale obtenue étant ensuite utilisée au sein de la fonction d'évaluation de la fonction objectif décrite dans la partie suivante.

3.4.3. Fonction objectif : rappel et évaluation

Conformément aux éléments indiqués lors de sa présentation au sein de la partie 2.6 du troisième chapitre, la fonction objectif peut être décomposée en trois parties à savoir le chiffre d'affaire issu des ventes, les coûts de construction long terme de la solution, correspondants au dimensionnement des ressources ainsi qu'aux pénalités relatives aux changements d'affectation, et les coûts opérationnels issus des stocks, des coûts de production, des transferts de ressources et de la pénalisation de la dispersion de la production des agrégats produit appartenant à une même famille de standardisation.

Outre l'utilisation de la fonction propre au dimensionnement des ressources ainsi que de celle relative au calcul de leur transfert, l'évaluation de ces différents paramètres est réalisée par la prise en compte des quantités et lieux de production des agrégats produits lors des différentes périodes. Ainsi, ce processus, résumé par l'intermédiaire de l'Algorithme 14, est relativement aisé à comprendre. Cependant deux points particuliers doivent être plus particulièrement explicités, à commencer par la prise en compte des stocks initiaux. En effet, de par le fonctionnement même du processus de planification, pour chaque agrégat produit, les quantités fabriquées correspondent exactement à la demande, déduction faite des stocks initiaux. Ainsi, il convient d'ajouter ces derniers aux quantités produites afin de déterminer la satisfaction de la demande. Cependant, il est également indispensable de tenir compte du cas spécifique où les stocks initiaux sont supérieurs à la demande totale, auquel cas il convient de considérer un niveau de satisfaction équivalent à cette dernière et non supérieure (lignes 25 – 29). Le second point sur lequel il semble nécessaire de revenir concerne la pénalisation de la dispersion de la production des différents agrégats produits. Celle-ci consiste à pénaliser le nombre d'usines différentes utilisées afin de fabriquer les éléments d'une même famille de standardisation. Pour ces dernières, celles-ci sont comptabilisées par l'intermédiaire de la variable *liste_Usine_Famille* en ajoutant au fur et à mesure du parcours des différents agrégats produits les différentes usines utilisées (ligne 20). Notons à ce propos que la fonction « ajout » utilisée n'ajoute un élément dans une liste que s'il n'y est pas déjà présent. Autrement dit, pour chaque famille de standardisation, aucune redondance n'est présente dans *liste_Usine_Famille*, si bien que sa taille, utilisée lors du calcul de la fonction objectif (ligne 35), est révélatrice du nombre réel d'usines utilisées pour chaque famille.

Au-delà des différents éléments indiqués dans le paragraphe précédent, il convient également de noter que lors de l'évaluation du nombre de changements d'affectation réalisés vis-à-vis de la solution initiale (lignes 40-44), seuls les agrégats produits non nouveaux sont considérés. En effet, comme indiqué au sein de la partie 2.4.4 du chapitre 3, les nouveaux agrégats produits ne sont pas pris en compte dans le cadre du calcul des changements d'affectation vis-à-vis de la configuration initiale.

Comme illustré tout au long de ce chapitre, le processus d'évaluation est constitué de nombreuses étapes consistantes à déterminer la valeur de la fonction objectif. En fonction de cette dernière, un certain nombre de solutions sont retenues, celles-ci faisant ensuite l'objet d'une recherche locale dans le but de les améliorer, ce dernier point faisant l'objet de la partie suivante.

Algorithme 14 : calcul de la fonction objectif**Procédure** Calcul_Fonction_Objectif(s)**Début**

```

1.  coût_Ressource ← Dimensionnement_Ressource(ressource_Tot)
2.  somme_Transfert ← Evaluation_Transfert_Ressource()
3.  chiffre_Affaire ← 0
4.  c_Prod ← 0
5.  c_Stock ← 0
6.  f_Objectif ← 0
7.  pour p=1 à nb_Ag_Pdt_Tot faire
8.    f ← famille[p]
9.    demande_Tot ← 0
10.   sat_Demande ← 0
11.   pour t=1 à nb_Période faire
12.     c_Stock ← c_Stock + stock[p][t]
13.     demande_Tot ← demande_Tot + demande[p][t]
14.     pour u=1 à affectation[p].size() faire
15.       usine ← affectation[p][u]
16.       pour h=0 à composition_Usine[u].size() faire
17.         l ← composition_Usine[u][h]
18.         sat_Demande ← sat_Demande + qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t]
19.         si qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t] > 0 alors
20.           ajout(u, liste_Usine_Famille[f])
21.           c_Prod ← c_Prod + qte_Pdtes_L_Prod[p][l][t] x
                                coût_Production[p][l]
22.         fin si
23.       fin pour
24.     fin pour
25.     si stock_Init[p] < demande_Tot alors
26.       sat_Demande ← demande_Tot
27.     sinon
28.       sat_Demande ← sat_Demande + stock_Init[p]
29.     fin si
30.   fin pour
31.   chiffre_Affaire ← chiffre_Affaire + sat_Demande x p_Vente[p]
32. fin pour
33. nb_Usine_Tot ← 0
34. pour f=1 à nb_Famille faire
35.   nb_Usine_Tot ← nb_Usine_Tot + liste_Usine_Famille[f].size()
36. fin pour
37. F_Objectif ← chiffre_Affaire - coût_Ressource - somme_Transfert x 3
               c_Transfert - c_Prod - c_Stock - nb_Usine_Tot x
               penalite_Prod_Famille
38. changement_Affectation ← 0
39. pour tout agrégat produit p, p ∈ Ag_Pdt \ nouv_Ag_Pdt faire
40.   si affectation[p] <> affectation_Initiale[p] alors
41.     changement_Affectation ← changement_Affectation + 1
42.   fin si
43. fin pour
44. F_Objectif ← F_Objectif + changement_Affectation x
               penalite_Changement_Affectation
45. retourner(F_Objectif)

```

Fin

3.5. Recherches locales

L'étape de construction d'une solution à partir de la configuration initiale, introduite au sein de la partie 3.2, repose principalement sur deux opérations distinctes à savoir la génération de changements d'affectations ainsi que l'augmentation du nombre d'agrégats produits affectés à plus d'une usine. Ces deux processus sont basés, notamment, sur un choix aléatoire tant en termes de types que de nombre d'agrégats produits sélectionnés. Par conséquent, dans le but d'améliorer les solutions ainsi construites vis-à-vis de la fonction objectif, il convient de déterminer la part de ces modifications effectivement nécessaires et celles pouvant être supprimées sans pour autant affecter leur qualité. Cette opération est réalisée par l'intermédiaire d'une recherche locale décrite au sein des parties suivantes.

3.5.1. Principe générale de la recherche locale

La recherche locale, dont l'objectif correspond à l'amélioration de la solution initiale, a été décomposée en deux sous-parties correspondantes chacune à une des étapes du processus de construction d'une solution. Plus précisément, comme illustré par l'intermédiaire de l'Algorithme 15 est considérée une phase, intitulée « réduction_Multi_alloués » consistant à réduire le nombre d'agrégats produits affectés à plus d'une usine, ainsi qu'une autre appelée « réduction_Modification_Affectation » dont l'objectif correspond à la diminution du nombre de changements d'affectations vis-à-vis de la solution initiale.

Algorithme 15 : processus de recherche locale

Procédure recherche_Locale(s)

Début

1. $s \leftarrow \text{Réduction_Multi_alloués}(s)$

2. $s \leftarrow \text{Réduction_Modification}(s)$

Fin

Afin d'expliciter ce processus, ont été introduites les deux parties suivantes dédiées chacune à une de ces deux étapes de la recherche locale.

3.5.2. Réduction du nombre d'agrégats produit multi-affectés

La construction d'une solution à partir de la configuration initiale présentée au sein de la partie 3.2 consiste, une fois le changement d'affectation des agrégats produits sélectionnés réalisé, à définir le nombre de multi-affectations supplémentaires à introduire puis à mettre en œuvre les modifications correspondantes. Par conséquent, de par le caractère aléatoire de ces choix, il convient de déterminer les multi-affectations supplémentaires pertinentes et, à l'inverse, celles pouvant être supprimées et, ce, même si la solution courante considérée s'avère être de bonne qualité.

Afin de mener à bien cette étape de vérification, a été introduite une fonction spécifique. Celle-ci, dont l'algorithme détaillé est donné en annexe, consiste, à partir d'une solution courante préalablement construite à sélectionner aléatoirement un agrégat produit parmi la liste *ag_Pdt_Multi_alloués*, de ceux affectés à plus d'une usine. Notons que seuls ceux affectés à une unique au sein de la configuration initiale sont sélectionnés. En effet, comme indiqué lors du chapitre 3, la conservation de la multi-affectation d'un agrégat produit n'engendre pas de coûts supplémentaires à l'inverse de l'affectation à plusieurs usines d'un agrégat produit initialement affecté à une seule. Autrement dit, au lieu de les supprimer, il est préférable de profiter de la

flexibilité offerte par les agrégats produits initialement affectés à plusieurs usines afin de réduire le nombre de changements d'affectation visant à multi-affecter d'autres éléments

Une fois un agrégat produit sélectionné, la fonction consiste alors à l'affecter à une unique usine parmi celles pouvant le fabriquer, en prenant soin, éventuellement, de regrouper la production de tous les éléments appartenant à la même famille de standardisation au sein de cette même usine. Ensuite, la solution ainsi construite est évaluée, ceci se traduisant par le calcul de la fonction objectif associée. En fonction de cette dernière, les modifications apportées pourront être acceptées, auquel cas la configuration courante deviendra la nouvelle solution courante à partir de laquelle sera réitérée l'intégralité de la méthode. A ce propos, notons que celle-ci prendra fin lorsque la totalité des agrégats produits multi-affectés aura été parcourue ou bien qu'une suite de K solutions successives aura été générée sans qu'aucune d'entre elles aient été acceptée.

Cette étape, constituant une recherche locale, a donc pour but de réduire le nombre d'agrégats produits multi-affectés dans le but d'augmenter la qualité de la solution courante. Cependant, cette approche ne constitue par l'unique voie d'amélioration envisageable, la seconde correspondante à une diminution du nombre de changements d'affectations vis-à-vis de la configuration initiale. Avant de s'intéresser à cet aspect au sein de la partie suivante, il convient de préciser que l'ordre dans lequel sont sélectionnés les agrégats produits peut avoir un impact sur la solution obtenue à l'issue de la recherche locale. En effet, l'opportunité d'affecter un agrégat produit à une unique usine sera d'autant plus faible que le nombre de modifications de la solution courante précédemment réalisées sera important ; nombre augmentant d'autant plus que l'agrégat produit sera sélectionné tardivement.

3.5.3. Réduction du nombre de changements d'affectations vis-à-vis de la solution initiale

Au sein de la fonction objectif sont considérés différents coûts mais également des pénalités relatives notamment au nombre de changement d'affectations réalisé vis-à-vis de la configuration initiale. Ce dernier point constitue donc une voie d'amélioration possible d'une solution. Ainsi, après la diminution du nombre d'agrégats produits multi-affectés, la seconde phase de la recherche locale consiste à chercher à réduire les modifications de type « un pour un » c'est-à-dire correspondante à l'affectation à une unique usine d'un élément initialement affecté à une autre. Cependant, dans ce contexte ne sont pas considérés les nouveaux agrégats produits, les modifications apportées à leur affectation n'étant pas pénalisées (voir 2.4.4).

Compte tenu de ces différents éléments, la seconde phase de la recherche locale correspondante à la réalisation de la sous-fonction « réduction_Modification_Affectation(s) » consiste à parcourir l'ensemble des agrégats produits et à sélectionner ceux ayant fait l'objet d'un changement d'affectation vis-à-vis de la solution initiale et n'étant pas nouveaux. Ensuite, pour chacun d'eux est construite une nouvelle solution. Celle-ci est identique à la solution courante à ceci près que l'agrégat produit sélectionné est alors affecté à la même usine que dans la configuration initiale. Ensuite, assez logiquement, si cette nouvelle solution présente une meilleure fonction objectif que la précédente, elle est acceptée et dans le cas contraire rejetée.

Comme la précédente, cette seconde étape de la recherche locale, dont l'algorithme associé peut être retrouvé en annexe, constitue une réponse à l'aspect aléatoire de la génération des solutions, en l'occurrence le choix du nombre et du type d'agrégats produits devant faire l'objet d'un changement d'affectation. Afin d'illustrer leur efficacité et d'une manière plus générale celle de l'ensemble de la métaheuristique, il convient de présenter différentes applications numériques.

Cependant, avant d'introduire de tels exemples au sein de la partie suivante, il est nécessaire de préciser qu'afin de présenter l'ensemble des algorithmes d'une manière lisible et claire, un certain nombre de paramètres liés à la mise à jour des variables ont été omis sans pour autant affecter la compréhension ni la validité des éléments présentés.

4. Performance de la métaheuristique

Lors de l'introduction de tout algorithme et, à fortiori d'une métaheuristique, au-delà du principe même de sa construction, deux éléments relativement importants doivent être introduits, en l'occurrence la qualité des résultats obtenus ainsi que les temps d'exécution associés ; ces éléments faisant l'objet de cette partie. Plus précisément, notre GRASP sera évalué à travers la réalisation de deux types d'applications numériques, le premier étant destiné à l'évaluation de la qualité des résultats obtenus et le second à celle des temps d'exécution. Notons que d'une manière similaire à ceux présentés dans la partie 3.7 du chapitre 3, les tests ont été construits par une génération aléatoire des données de demande des différents agrégats produits, de capacités ainsi que de coûts. Cependant, comme précédemment, ceci a été réalisé tout en prenant soin de faire intervenir une saisonnalité au niveau de la demande et des capacités; le but étant là encore de se rapprocher de situations pouvant effectivement se produire dans un contexte industriel. Autrement dit, bien que purement fictives, les applications numériques construites traduisent des phénomènes pouvant intervenir dans un contexte réel.

4.1. Evaluation de la qualité des résultats – prise en compte d'instances de petites tailles

Afin d'estimer la qualité des résultats fournis par le GRASP, il apparaît indispensable de disposer de valeurs références par rapport auxquelles se comparer. Notre problème n'ayant été adressé tel quel au sein de la littérature, les seuls éléments de comparaison disponibles sont constitués de ceux fournis par la résolution d'instances à l'aide du modèle linéaire précédemment introduit. Ainsi, ont été repris les tests présentés dans la partie 3.7 du chapitre 3. Notons, qu'outre le fait que ces instances aient déjà été définies, ce choix répond au fait que le modèle linéaire ne permette pas la résolution de problèmes de grandes tailles dans des délais adéquats. Dans ce contexte, il n'est donc pas opportun de chercher à générer de nouveaux exemples plus conséquents, aucun élément de comparaison ne pouvant être défini.

Comme indiqué tout au long des parties précédentes, notre métaheuristique repose, notamment, sur un processus de construction des solutions ainsi qu'un autre destiné à leur évaluation ; ce dernier correspondant à la réalisation d'une planification de la production. Ainsi, dans le cadre de l'évaluation de sa qualité, ces deux éléments doivent être adressés. Pour se faire, deux types de résultats, issus du modèle linéaire ainsi que du GRASP développé, ont été comparés au sein des Tableau 9 et Tableau 10. Le premier concerne l'évaluation de la configuration initiale, ceci permettant d'estimer la qualité de la planification réalisée par l'intermédiaire de la métaheuristique. Le second, quant à lui, correspond à la meilleure solution alternative obtenue à l'aide du GRASP. Notons que pour les résultats issus du modèle linéaire, par rapport auxquels ont été comparées les solutions provenant du GRASP, les écarts vis-à-vis de des bornes inférieures estimées par Cplex ont été indiqués.

A travers l'analyse du Tableau 9, nous pouvons constater que la planification réalisée par la métaheuristique s'avère être de plus mauvaise qualité que celle fournie par le modèle linéaire, hormis dans le cas de la dernière instance (amélioration de la solution de 56%). Ceci met en évidence le caractère « monolithique » du GRASP développé, c'est-à-dire le fait que l'évaluation

des solutions, à travers la réalisation d'une planification, est effectuée d'une manière déterministe identique quelle que soit l'instance considérée. Plus précisément, la programmation de la production est toujours mise en œuvre d'une manière similaire avec pour seul objectif de planifier la production de la demande dans le but de la satisfaire au maximum ; le coût engendré étant calculé à posteriori. Ainsi, selon l'importance que revêtent les prix de ventes associés aux agrégats produits par rapport aux différents coûts, la qualité de la planification ne sera pas la même. Afin d'illustrer cette notion, considérons les Figure 33 et Figure 34. Celles-ci correspondent respectivement à la satisfaction de la demande, au volume des stocks ainsi qu'aux pertes de capacités obtenus dans le cadre de la résolution du premier test pour deux scénarios de coûts différents. Plus précisément, est considérée en plus de la première instance déjà introduite, une autre similaire mais pour laquelle les coûts de stockages ont été divisés par dix. Bien entendu, compte tenu des éléments précédemment indiqués, les résultats obtenus à partir du GRASP sont identiques. A l'inverse, dans le cas du modèle linéaire ceux-ci varient. Plus précisément, assez naturellement, dans le cadre du second problème, le niveau des stocks a été réduit et, par voie de fait, celui de la satisfaction de la demande également. En ce qui concerne les pertes de capacités, celles-ci se sont au contraire accrues.

Cette courte analyse met donc en évidence l'aspect « figé » de notre approche se traduisant, dans les faits, par l'absence d'une réelle recherche de la meilleure solution lors du processus de planification. Cette démarche est justifiée par deux paramètres importants à savoir la recherche d'une évaluation la plus juste possible et la volonté de ne pas aboutir à des temps d'exécution trop importants. En effet, l'objectif de cette phase d'évaluation, étant d'étudier l'impact réel de décisions stratégiques au niveau tactique, il est préférable, non pas, de rechercher la meilleure planification possible, mais plutôt celle qui sera effectivement réalisée. Ainsi, il convient de définir un processus de planification le plus similaire possible à celui mis en œuvre au sein des usines. Or, dans un tel contexte, les décisions de planification sont bien souvent prises en considérant des paramètres figés tels que des tailles de lots minimums (correspondantes à nos tailles de campagne) ainsi que des volumes de stocks maximums (correspondants au nombre maximum de périodes successives de stocks pouvant être constituées) tandis que des arbitrages entre les différents produits sont effectués en cas de capacités insuffisantes. De plus, remarquons que d'une manière générale, au niveau tactique, l'objectif correspond d'avantage à une maximisation de la satisfaction de la demande et à la saturation des capacités ; ces dernières ayant été dimensionnées au niveau stratégique par un arbitrage entre coûts de non saturation et stocks ; ce point étant abordé d'une manière plus détaillée lors de la partie consacrée à la présentation d'un environnement intégré de planification. Ainsi, dans notre cas, afin d'évaluer le plus vraisemblablement possible la qualité des solutions générées pour les discriminer entre elles, il est plus opportun de développer une démarche de planification similaire à celle du GRASP plutôt que de mettre en œuvre une réelle optimisation moyen terme du profit. Remarquons qu'une telle approche ne peut être facilement mise en œuvre à l'aide d'un modèle linéaire, le principe de résolution associé couplant la construction de solutions avec leur évaluation.

Instance	Modèle linéaire		GRASP	
	Fonction objectif ($\cdot 10^3$)	Ecart borne inf (%)	Fonction objectif ($\cdot 10^3$)	Ecart modèle linéaire (%)
1	4 510	0,28	4 274	-5,23
2	9 392	0,36	9 111	-2,99
3	17 771	0,06	17 424	-1,95
4	9 445	0,02	7 670	-18,79
5	14 069	1,96	13 232	-5,95
6	18 880	1,61	13 962	-26,05
7	44 461	142	69 372	56,02

Tableau 9: Evaluation de la configuration initiale – comparaison des solutions issues de umodèle linéaire et du GRASP

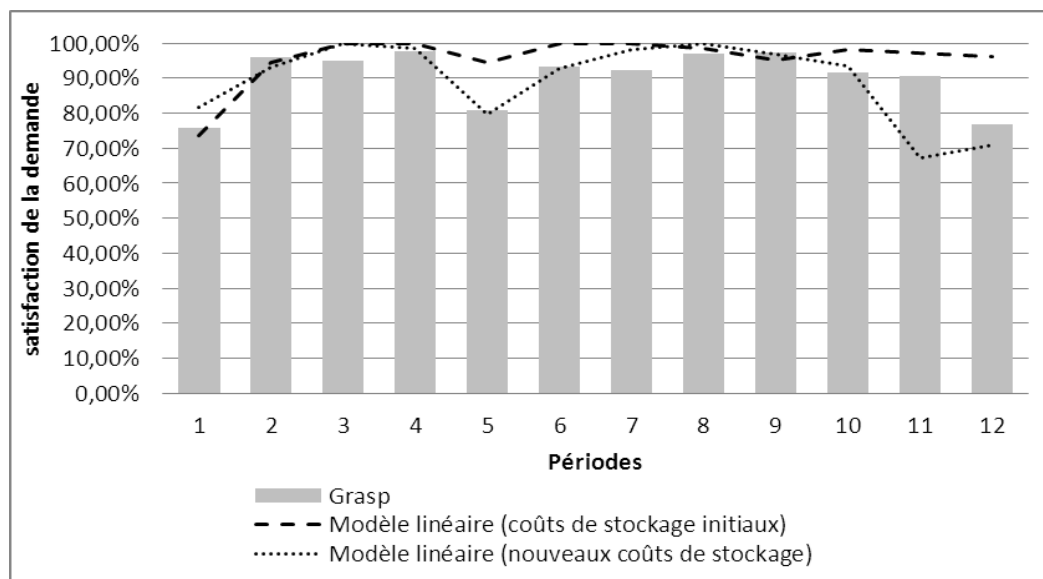


Figure 32 : Satisfaction de la demande périodique en fonction des scénarios de coûts de stockage

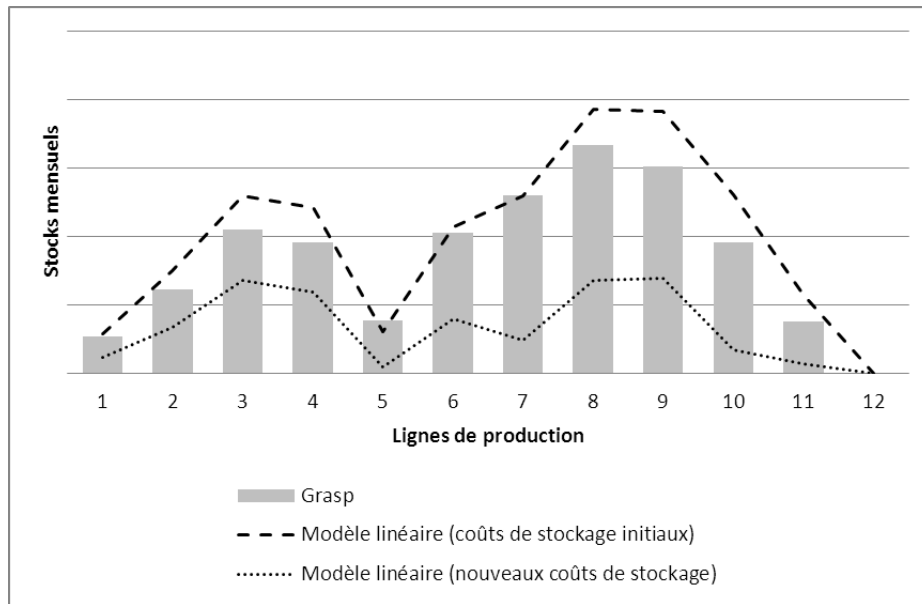


Figure 33 : Satisfaiton stocks périodiques en fonction des scénarios de coûts de stockage

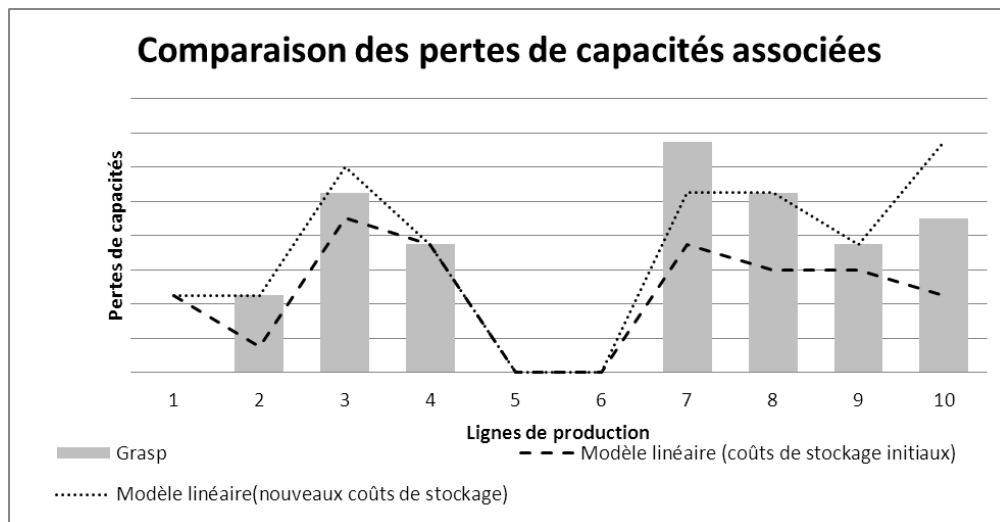


Figure 34 : Pertes de capacités périodique en fonction des scénarios de coûts de stockage

A ce stade de la présentation des résultats, il convient tout de même de préciser qu'une approche « d'optimisation » de la planification pourrait être mise en œuvre au sein de notre GRASP. Plus précisément, nous pourrions opter pour un processus itératif consistant, par exemple, à générer différents plans de production moyen terme en modifiant l'ordre de parcours des différentes usines et au sein d'elles de celui des lignes de production. Cependant, une telle démarche présente le désavantage d'augmenter les temps d'exécution de la méthode. Or, ceci n'est pas souhaitable ; l'un des objectifs de nos travaux étant d'aborder des problèmes de grande taille dans des temps adéquats. A ceci s'ajoute également la volonté de tenir compte de l'incertitude relative à la demande ; ceci pouvant nécessiter notamment la mise en œuvre d'une approche multi scénarios se traduisant par une multiplication du nombre d'itérations. Dans ce contexte, il devient alors indispensable de disposer d'une méthode de résolution permettant, pour

un scénario de demande, d'obtenir des résultats le plus rapidement possible et, ceci, afin de ne pas aboutir à des temps de résolution globaux trop conséquents.

Au-delà de ces éléments, il est important de remarquer, que, bien que notre processus d'évaluation des solutions s'avère être de moins bonne qualité que celui issu du recours à la programmation linéaire ; il présente l'avantage de ne pas varier au cours du temps. Autrement dit, les différentes solutions générées ainsi que la configuration initiale, sont toutes évaluées selon le même processus. Or, ce processus correspond à celui effectivement mis en œuvre au sein d'une usine si bien qu'il permet de discriminer d'une manière fiable les solutions entre elles afin de choisir la plus juste. Ceci justifie d'autant plus la pertinence de notre GRASP ; la démarche de planification ayant uniquement pour objectif de discriminer les solutions entre elles et non de proposer un réel Programme Directeur de Production. De plus, il convient de noter que le GRASP permet de réaliser une évaluation de la solution initiale de meilleure qualité dans le cas d'instances de grandes tailles. En effet comme indiqué sur le Tableau 9, pour l'instance 7, la solution obtenue par le GRASP améliore celle issue du modèle linéaire de 56%. Ceci provient du fait que de par la taille du problème, la programmation linéaire ne permet par l'obtention d'une solution de bonne qualité en moins de 6h00 de temps de calcul. Notons que cette conclusion n'est pas tirée uniquement de l'unique analyse de l'instance 7 mais à travers celle de nombreux tests de tailles plus importantes pour lesquelles aucune évaluation des solutions initiales associées n'a pu être réalisée à l'aide du MILP. Aussi, il apparaît donc préférable de recourir dans ce contexte à notre GRASP plutôt qu'à la programmation linéaire.

La fiabilité de la démarche de discrimination des solutions ayant été prouvée, il convient désormais de s'intéresser aux résultats obtenus par le GRASP pour les différentes instances précédemment introduites. Ainsi, au sein du Tableau 10 a été reportée la meilleure fonction objectif obtenue par le GRASP pour chacun de ces tests. Comme indiqué, dans tous les cas, les meilleures solutions obtenues se traduisent par une amélioration de la configuration initiale ; cette amélioration atteignant plus de 20% dans le cas de la 6^{ème} instance. Précisons que ces comparaisons sont, bien entendu, effectuées avec les évaluations des configurations initiales réalisées par ce même GRASP et reportées au sein du Tableau 10. Ainsi, compte tenu des éléments indiqués précédemment quant à la fiabilité de la discrimination des solutions par l'intermédiaire de notre processus d'évaluation, nous pouvons conclure à la pertinence du GRAPS proposé ; celui-ci aboutissant systématiquement à la construction de solutions de meilleures qualités que les configurations initiales associées.

Instance	GRASP			Modèle linéaire	
	Fonction objectif ($\cdot 10^3$)	Amélioration de la configuration initiale	Ecart modèle linéaire	Fonction objectif ($\cdot 10^3$)	Ecart borne inf
1	4 424	+3,51%	-3,61%	4 590	5,56%
2	9 212	+1,11%	-3,85%	9 581	2,24%
3	18 082	3,78%	+2,26%	17 798	8,38%
4	8 690	13,30%	-7,42%	9 386	4,16%
5	13 301	0,52%	-2,84%	13 690	7,01%
6	16 984	21,64%	/	Pas de solution réalisable	
7	71 159	2,58%	/	Pas de solution réalisable	

Tableau 10: Meilleures solutions obtenues – comparaison des résultats issus du modèle linéaire et du GRASP

A titre informatif, a également été introduite au sein du Tableau 10, une comparaison des résultats obtenus avec ceux provenant du modèle linéaire ; sa portée étant limitée compte tenu des différences liées au processus d'évaluation mentionnées précédemment. Notons que dans le cas des deux dernières instances, aucune comparaison ne peut être réalisée ; le MILP ne permettant pas l'obtention d'une solution réalisable. Ceci souligne, à nouveau, l'impossibilité de recourir à la programmation linéaire afin de résoudre des instances de tailles intermédiaires et encore moins à d'autres correspondantes à des cas industriels réels. Rappelons d'ailleurs que ceci constitue une justification majeure de la construction de notre métaheuristique. Ainsi, afin d'appréhender d'avantage la qualité des résultats obtenus dans un tel contexte, il convient de s'intéresser spécifiquement à l'application du GRASP dans le cadre de problèmes de grandes tailles.

4.2. Evaluation de la qualité du GRASP– Application à des instances de grande taille

L'une des justifications à l'introduction du GRASP étant sa capacité à résoudre des instances de tailles importantes, il convient de revenir plus spécifiquement sur ce type d'applications. Ainsi, dans le cadre de cette partie sont introduits quatre tests constitués d'un nombre relativement important de données. Notons que dans ce cas, aucune mention n'est faite du MILP présenté lors du chapitre 3 ; le recours à la programmation linéaire ne permettant pas de résoudre ces instances dans des temps de calcul inférieurs à 10h00.

Dans ce contexte, ont été considérées les différentes configurations d'un système de production mentionnées au sein du Tableau 11. Notons que, comme précédemment, les données associées ont été générées aléatoirement en prenant soin d'introduire une saisonnalité au niveau de la demande et des capacités ; le but étant d'obtenir des situations pouvant effectivement être rencontrées dans un contexte industriel. Pour chacun de ces tests, ont été illustrés, au sein du Tableau 12, les gains offerts par le recours au GRASP. Ainsi, quelle que soit l'instance considérée,

la solution retenue présente une meilleure fonction objectif que la configuration initiale associée, ces améliorations pouvant atteindre quasiment 10%. Bien entendu, de tels progrès dépendent, en outre de la qualité de la solution générée, de celle de la configuration initiale. Plus précisément, plus cette dernière sera proche de la solution optimale, plus les pourcentages possibles de progrès seront faibles. Précisons tout de même que quel que soit l'instance considérée, et au-delà du pourcentage associé, les améliorations de la fonction objectif obtenues portent sur plusieurs millions d'euros à chaque fois ; ce qui constituerait des performances très significatives dans le cadre de problèmes réels.

Instance	Nombre d'usines	Nombre de ligne de production	Nombre d'agrégats produits	Nombre de famille de standardisation	Nombre de périodes
8	10	20	200	7	24
9	10	40	200	7	24
10	10	40	200	7	36
11	10	40	1000	100	36

Tableau 11 : Instances de grandes tailles considérées

Instance	Fonction objectif			
	Solution initiale	Meilleure solution	Amélioration (€)	Amélioration (%)
8	74,50.10 ⁶	83,21.10 ⁶	+ 8,71 .10 ⁶	+9,45
9	81,63.10 ⁶	86,56.10 ⁶	4,93.10 ⁶	+4,93%
10	138,54.10 ⁶	141,23.10 ⁶	2,67.10 ⁶	+1,89%
11	471,90.10 ⁶	493,76.10 ⁶	21,86.10 ⁶	+ 4,73%

Tableau 12 : Résultats associés à l'application du GRASP dans le cadre d'instances de grande taille

Instance	Satisfaction de la demande			Stocks moyens mensuels	
	Solution initiale	Meilleure solution	Amélioration (vol.)	Solution initiale	Meilleure solution
8	81,76%	87,93%	292 879	67 246	105 168
9	86,11%	90,99%	231 645	66 153	76 082
10	97,67%	99,41%	123 892	98 122	86 800
11	66,81%	69,75%	1 046 674	326 086	337 656

Tableau 13: Evolution de la satisfaction de la demande et des stocks pour les différentes solutions générées

Assez logiquement, ces améliorations se sont traduites de manières différentes selon les critères composant la fonction objectif. En ce qui concerne le chiffre d'affaire, celui-ci a augmenté et, ce, quel que soit l'instance considérée. Cet aspect peut être illustré par la comparaison des taux de satisfaction de la demande associés à la configuration initiale et à la solution retenue par le recours au GRASP et, ceci, pour chacun des tests réalisés. Ainsi, comme illustré sur le Tableau 13, pour toutes les instances considérées, l'utilisation de notre métaheuristique se traduit par l'obtention de solutions améliorant la satisfaction de la demande vis-à-vis du scénario de demande considéré. Ces améliorations vont de 1% à 6%, ce qui peut paraître à première vue relativement faible. En réalité, par une analyse des volumes associés, il est aisé de se rendre compte que ces améliorations sont significativement intéressantes car portant sur plusieurs centaines de milliers de produits à chaque fois.

Notons que ces évolutions de la satisfaction de la demande se sont traduites différemment, selon les instances considérées, sur le niveau des stocks qui est également un paramètre de la fonction objectif. Ainsi, dans le cas des tests 8, 9 et 11, les solutions obtenues présentent un stock moyen mensuel supérieur à celui obtenu pour la configuration initiale associée, à l'inverse de l'instance 10. Le fait que ces paramètres de la fonction objectif n'évoluent pas de la même manière selon les solutions considérées provient de la différence en terme d'équilibrage charge-capacité des différentes instances. Ainsi, comme illustré sur la Figure 35, la neuvième et la dixième instance correspondent au cas d'une capacité supérieure à la demande et présentant la même saisonnalité. A l'inverse, les deux autres représentent des systèmes de production présentant des capacités relativement uniformes sur l'ensemble de la période comparativement à la demande ; ceci aboutissant à des périodes successives de surcharges et d'autres de sous-charges. Par conséquent, compte tenu de cette spécificité, afin de parvenir à augmenter le niveau de satisfaction de la demande, dans le cadre de ces deux dernières instances, il s'avère nécessaire d'augmenter le volume des stocks. Notons que ceci, corroborant les résultats présentés dans le Tableau 13, suppose que le coût de détention du stock soit plus faible que la marge réalisée sur la vente des produits, ce qui est le cas ici.

Au-delà de l'évolution des profils associés sur l'horizon considéré, cette même Figure 35 illustre également la différence entre la charge et la capacité pour chacune des instances considérées.

Ainsi, nous pouvons noter que les tests 9 et 10 correspondent à des cas de sous-charge sur l'ensemble de l'horizon. Cependant, ceci doit être considéré au regard des pertes de capacité

associées à de telles solutions. En effet, comme indiqué dans les parties précédentes, la production, sur une même ligne de production et lors d'une même période, d'agrégats produits appartenant à différentes familles de standardisation entraîne une perte de capacité. Afin d'illustrer cet aspect, intéressons-nous plus spécifiquement au cas de l'instance 8. Pour celle-ci peuvent être retrouvés sur les Figure 36 et Figure 37, les profils de production et de satisfaction de la demande ainsi que de stocks associés respectivement à la configuration initiale ainsi qu'à la meilleure solution obtenue à l'aide du GRASP. Ces figures illustrent le fait que même lorsqu'à certaine période la demande ne peut être totalement satisfaite, la totalité des capacités n'est pas utilisée. Ceci provient des pertes engendrées par la fabrication d'agrégats produits appartenant à différentes familles de standardisation sur une même ligne de production lors d'une même période. Cet aspect est directement lié à l'affectation des productions propre à chacune des solutions. Ainsi, dans le cas de la configuration initiale et pour cette même instance 8, nous pouvons constater par l'intermédiaire de la

Figure 38 que le nombre moyen de familles de standardisation fabriquées au sein de chaque usine sur tout l'horizon des 24 périodes considérées est de 4. Ceci entraîne des pertes de capacités différentes selon les usines considérées. Ainsi, par exemple, dans le cas de la troisième les pertes de capacités sont nulles alors même qu'elles s'avèrent importantes pour la première. Ceci provient du fait, qu'au sein de la troisième usine deux agrégats produit appartenant à deux familles de standardisation différentes n'ont jamais été fabriqué sur une même ligne de production lors d'une même période, à l'inverse de la première. Par comparaison, avec la Figure 39, nous pouvons constater que les pertes de capacités sont plus importantes dans le cas de la meilleure solution (54 300 contre 48 150). Ainsi, dans le cadre de cette instance 8, afin de satisfaire au maximum la demande, il convient d'adopter une affectation des agrégats produits facilitant la diversité de la production au sein des différentes usines quitte à introduire des pertes de capacités importantes.

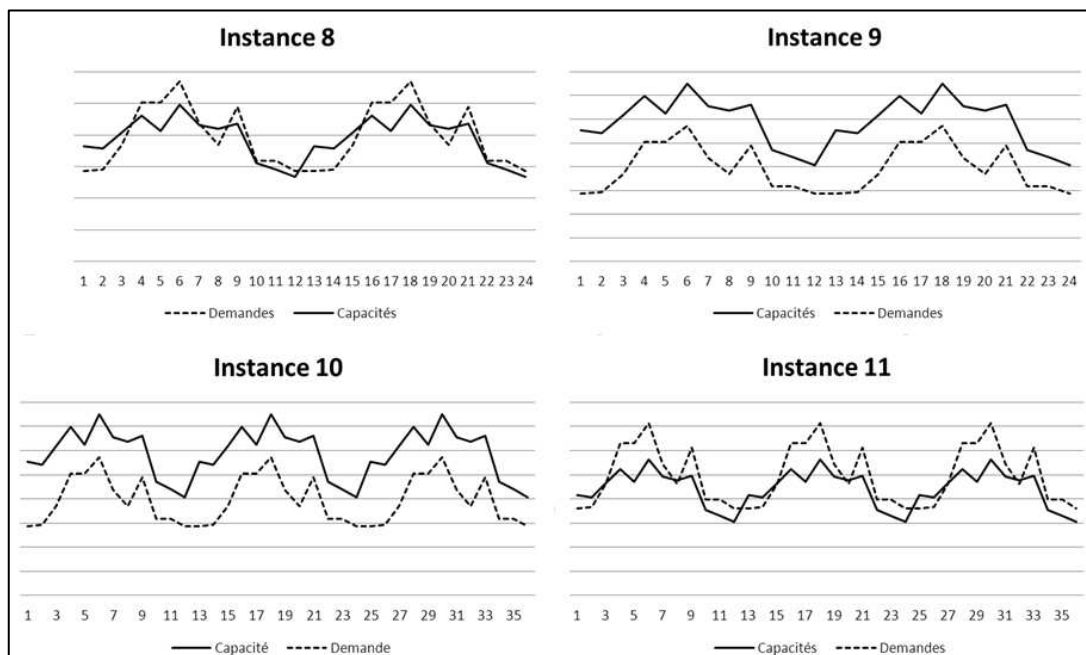


Figure 35: Equilibres charges – capacités associés aux instances 8-11

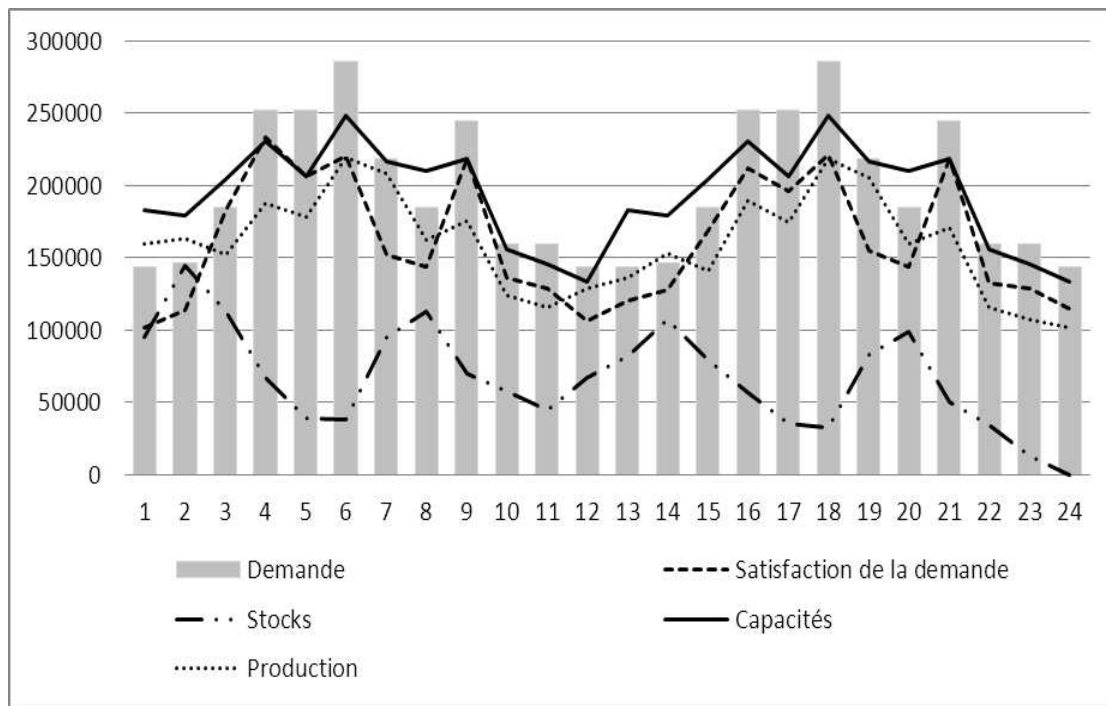


Figure 36 : Profil de production associé à la configuration initiale de l'instance 8

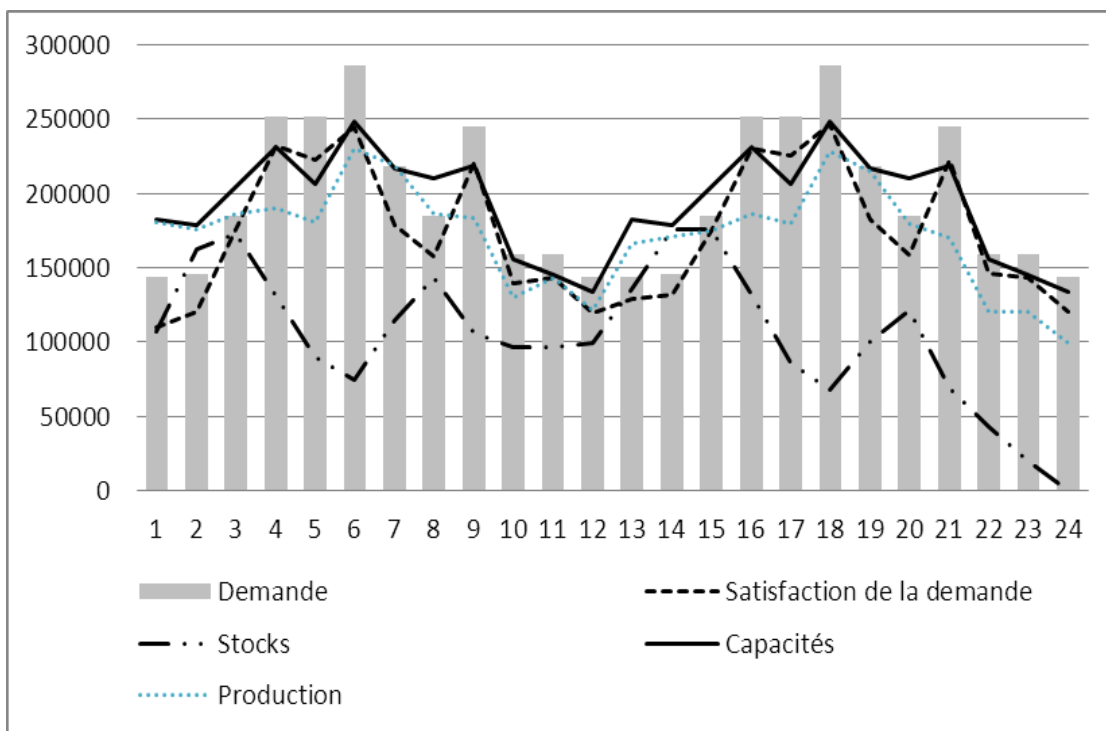


Figure 37 : Profil de production associé à la meilleure solution obtenue pour l'instance 8

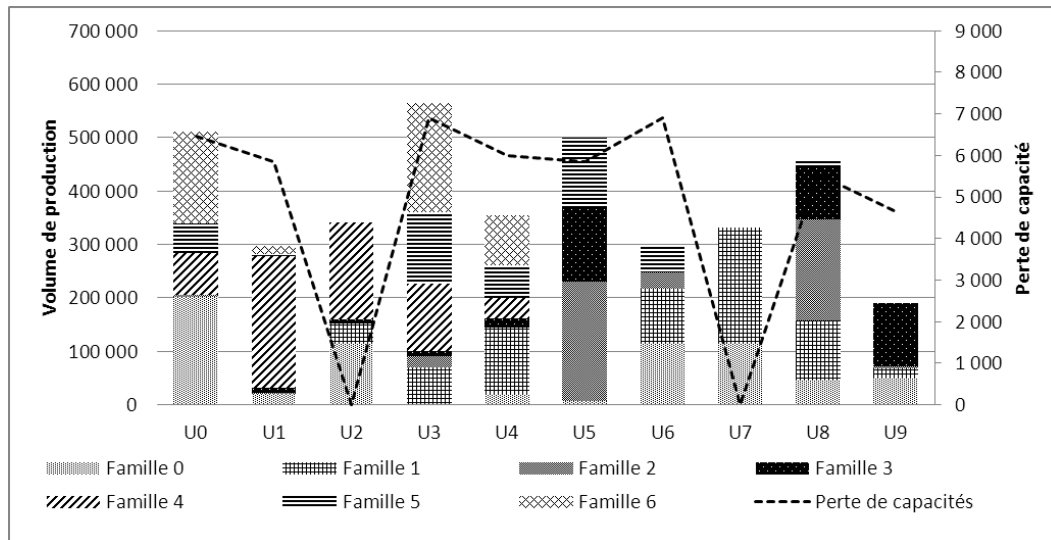


Figure 38: Répartition de la production dans le cas de la configuration initiale pour l'instance 8

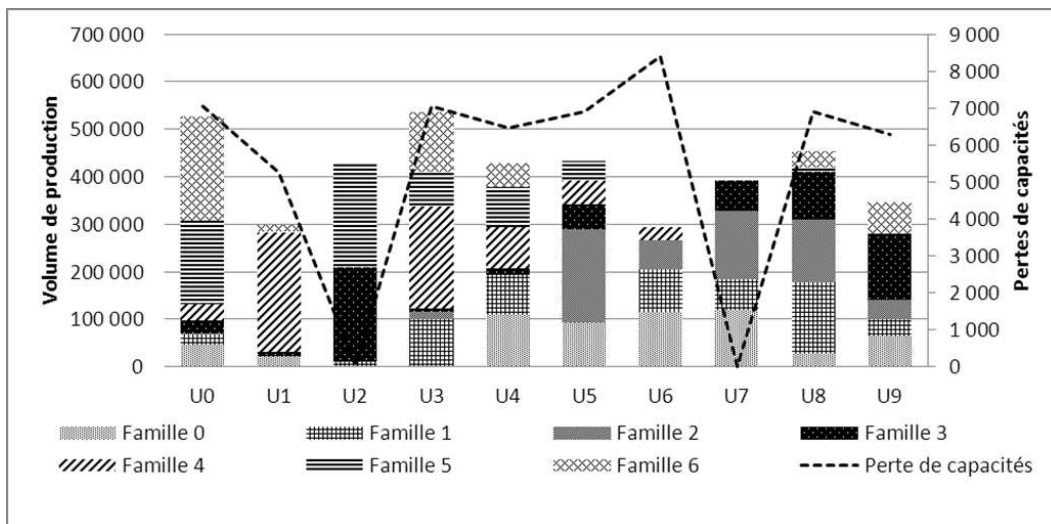


Figure 39 : Répartition de la production dans le cas de la meilleure solution obtenue pour l'instance 8

Bien entendu, ces valeurs de pertes de capacités sont à analyser au regard de l'équilibre charge-capacité initial. En effet, assez naturellement, plus les capacités disponibles seront faibles vis-à-vis de la demande plus les pertes de capacités auront tendance à être restreintes. Afin d'illustrer ces aspects, revenons sur l'instance 9 qui comme illustré sur la Figure 35 correspond au cas d'un système de production moins surchargé que celui associé à l'instance 8. Ainsi, alors que pour cette dernière le rapport (demande sur capacités disponibles) est de 102% (situation de surcharge), celui-ci est de 67% dans le cas du 9^{ème} test (situation de sous charge). Par conséquent, dans le cas de cette même instance 9, l'utilisation du GRASP s'est traduite par l'obtention d'une solution présentant une planification conduisant à la fabrication de d'avantages de familles de standardisation différentes au sein de chaque usine que dans le cas de l'instance 8. Plus précisément, comme illustré sur la Figure 40 le nombre moyen de familles de standardisation fabriquées au moins une fois sur l'horizon considéré au sein d'une usine est de 6 contre 4 auparavant. Bien entendu, ceci s'accompagne d'une perte de capacités plus importante. Plus précisément, dans le cas de l'instance 8 1,16% des capacités étaient perdues, suite à la fabrication

d'agrégats produits appartenant à différentes familles de standardisation sur une même ligne de production lors d'une même période, contre 1,31% dans le cas de la 9^{ème} instance. Autrement dit, dans ce dernier cas, les capacités étant suffisantes, il est préférable d'augmenter la diversité d'agrégats produits fabriqués sur chaque ligne de production à chaque période, quitte à entraîner des pertes de capacités, afin de réduire le volume des stocks et par conséquent les coûts associés. Notons, cependant, que pour ces deux tests, les capacités perdues s'avèrent relativement faibles.

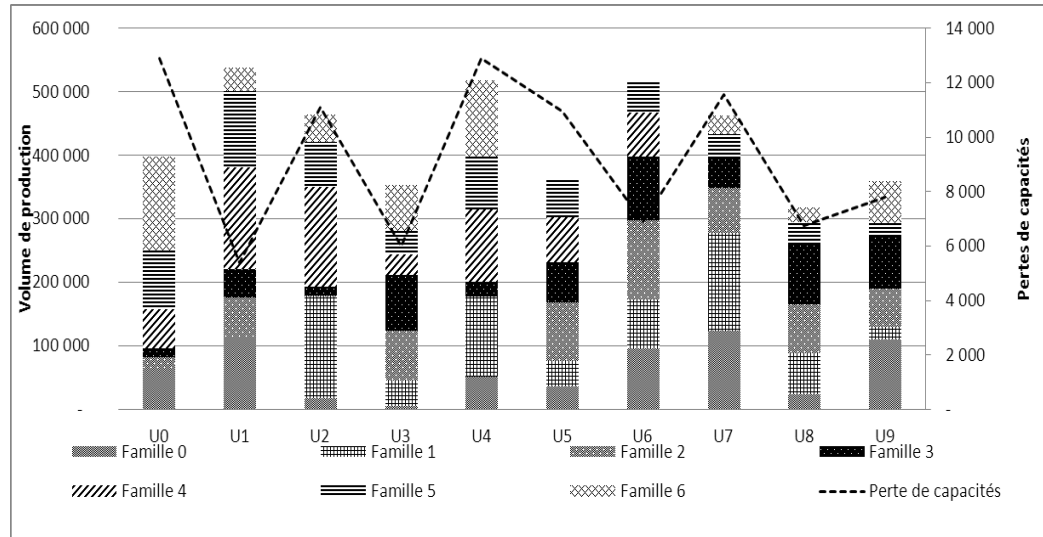


Figure 40 : Répartition de la production dans le cas de la meilleure solution obtenue pour l'instance 9

Les variations relatives aux différents paramètres constituant la fonction objectif ayant été présentées, il convient de préciser qu'elles proviennent de la réalisation d'un certain nombre de modifications vis-à-vis de la solution initiale ; celles-ci étant résumées au sein du Tableau 14. Ainsi, dans le cas de cette même instance 8, le nombre de changements d'affectations réalisés s'élève à 35 ; ceci se traduisant par une réduction du nombre d'agrégats produits multi-affectés de 12,70%. Ceci s'explique par le fait que la multi-affectation ne présente un réel avantage que dans le cas d'une demande variable nécessitant d'adapter la charge des usines en cas de déséquilibres capacitaires suite à un écart entre prévision et demande réelle. Ainsi, dans le cas de cette application numérique réalisée dans un contexte déterministe, il apparaît opportun de réduire le nombre de ces produits multi-affectés lors de la recherche locale. Notons également que la nouvelle solution générée présente une plus faible quantité de ressources. Autrement dit, de par l'affectation de la production associée, celle-ci permet d'obtenir un meilleur taux de satisfaction de la demande tout en nécessitant un plus faible nombre de ressources, ceci devant être mis en perspective avec la réduction du nombre d'agrégats produits multi-affectés discuté ci-dessus. De plus, cette plus faible quantité doit également être associée à la hausse du volume des stocks par rapport à la configuration initiale. En effet, ceci permet de lisser d'avantage la production et ainsi de réduire la quantité de ressources totale nécessaire à l'absorption des pics de production.

Instance	Nombre de changements d'affectation	Evolution du nombre de multi-affectés	Evolution du nombre de ressources
8	35	-12,70%	-19,32%
9	45	-27,26%	-22,23%
10	43	-12,15%	-14,90%
11	40	+2,22%	-9,11%

Tableau 14: : Modifications de la configurations initiales associées à la construction des solutions obtenues pour les différentes instances testées

Ces résultats présentés, il convient de rappeler que ces différentes instances n'ont pu être résolues à l'aide du modèle linéaire ; ceci soulignant la pertinence de notre métaheuristique. A ce propos, précisons que les temps d'exécution, associés à ces tests, sont de l'ordre de quelques secondes ; ceci étant abordé ultérieurement. De plus, notons que ces résultats ont été obtenus après la réalisation d'un paramétrage du GRASP. Comme illustré lors de la présentation des différents algorithmes, ceci correspond à l'ajustement du niveau de couverture des stocks autorisé ainsi que des tailles de campagnes ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

4.3. Paramétrage du Grasp : influence du nombre maximum de périodes de stocks et des quantités minimum à produire

Conformément aux éléments indiqués lors de l'introduction des différents algorithmes au sein des parties précédentes, l'utilisation du GRASP afin de résoudre une instance particulière doit être accompagnée du paramétrage de deux données d'entrée. La première, correspondante à la valeur de nb_Periode_stock_Max, a pour objectif de limiter l'anticipation de la production et ainsi de réduire le volume des stocks associés. La seconde, quant à elle, est relative au nombre minimum d'exemplaires de chaque agrégat produit à fabriquer et, ce, indépendamment des moyens de fabrication considérés (paramètre « t_camp »). Notons que, dans un cas réel, ces valeurs ne constituent pas de véritables données de paramétrages, celles-ci relevant bien souvent d'une décision managériale prise en fonction, notamment, d'une stratégie globale intégrant tant des critères de production et de satisfaction de la demande client que financiers.

Quand bien même ces éléments constituent de pures données d'entrées, il convient d'étudier leur influence sur la qualité des solutions déterminées par le GRASP. Pour ce faire, a été reprise la cinquième instance introduite précédemment. Pour celle-ci, ont été testées différentes valeurs de tailles de campagnes ainsi que de nombre maximum de périodes d'anticipation de la production autorisées au sein de la fonction de constitution des stocks. Plus précisément, pour chaque agrégat produit, la plus petite demande mensuelle sur l'horizon considéré a été déterminée ; demande à partir de laquelle ont été définies ensuite les différentes valeurs de taille de campagne testées. Ainsi, comme illustré sur la Figure 41 représentant les résultats obtenus, onze configurations différentes ont été évaluées ; celles-ci allant d'une taille de campagne équivalente, pour chaque agrégat produit, à 1,15 fois la demande minimum jusqu'à 9 fois. En étudiant cette figure, nous pouvons tout de suite noter le caractère particulier de la courbe exprimant la valeur de la fonction objectif en fonction des tailles de campagne considérées. Ainsi, jusqu'à une taille de campagne équivalente à 5 fois la demande minimale, la valeur de la fonction

objectif ne fait qu'augmenter pour diminuer ensuite. Ceci signifie, qu'en dessous de cet extrémum, les quantités minimums à fabriquer sont trop petites et se traduisent par une hausse de la diversité mise en fabrication sur chaque ligne de production et par conséquent par une augmentation des pertes de capacités, associées à la fabrication de différentes familles de standardisation, réduisant le taux de satisfaction de la demande et donc le chiffre d'affaire. A l'inverse, au-delà d'une taille de campagne égale à 5 fois la demande minimum, les quantités à fabriquer à chaque période deviennent trop importantes et se traduisent par une hausse significative du niveau des stocks réduisant d'autant la qualité des résultats obtenus. Notons que ces derniers ne sont bien entendu valables que dans le cas des données relatives à cette cinquième instance et ne sont aucunement transposables à un autre problème.

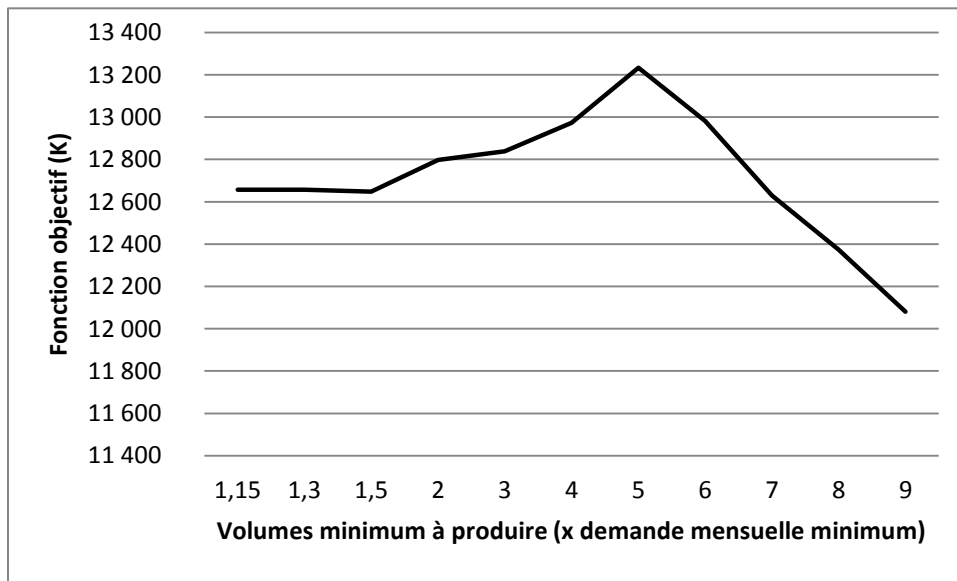


Figure 41 : Valeur de la fonction objectif en fonction des tailles de campagne dans le cas de la cinquième instance

En ce qui concerne le nombre maximal de périodes d'anticipation des productions autorisées au sein de la fonction de constitution des stocks, les résultats sont tout autre. En effet, nous pouvons constater, sur le graphe de la Figure 42, que la fonction objectif croît jusqu'à ce que l'anticipation maximum autorisée soit égale à 6 périodes avant de légèrement diminuer puis stagner. Ceci s'explique d'une part par le fait que, pour cette instance, les coûts de stockage sont relativement faibles par rapport au prix de vente des agrégats produits, si bien qu'il est plus avantageux de satisfaire la demande quitte à engendrer beaucoup de stocks; et d'autre part parce que, dans les faits, l'anticipation des productions dépasse rarement 8 mois. Notons que, là encore, ces résultats ne sont valables que dans le cas spécifique de l'instance considérée. De plus, il convient également de préciser que ces deux paramètres, que sont les tailles de campagne et le nombre maximum de périodes d'anticipation sont interdépendants ; le niveau de l'un pouvant influencer sur le niveau de l'autre et vice et versa.

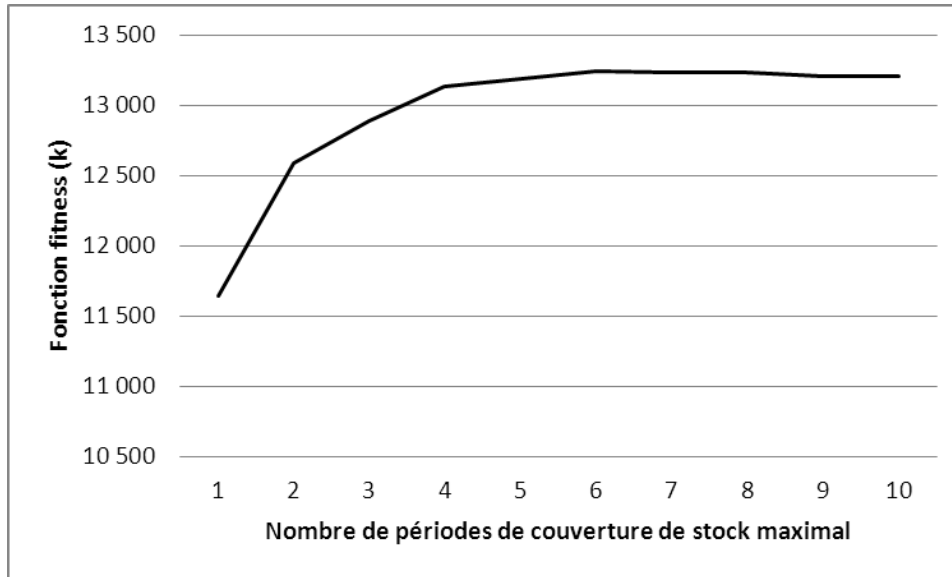


Figure 42 : Valeur de la fonction objectif en fonction du nombre maximal de périodes d'anticipation de la production autorisée dans le cas de la cinquième instance

A travers ces résultats, nous pouvons noter l'influence des tailles de campagnes ainsi que du nombre de périodes d'anticipation maximal des productions sur la valeur de la fonction objectif. Ces valeurs relevant, souvent, d'une décision managériale intégrant des éléments externes et financiers, leur paramétrage ne constitue pas une pratique inévitable dans le cadre de l'utilisation du GRASP afin de résoudre un problème réel. Ces précisions faites, il convient désormais de s'intéresser à l'une des caractéristiques les plus importantes associées à cette métaheuristique, en l'occurrence sa rapidité d'exécution et, ce, même dans le cadre d'instances de grande taille.

4.4. Evaluation des temps d'exécution

Précédemment a été illustrée la capacité de notre métaheuristique à résoudre des problèmes de grandes tailles. Bien que nous ayons indiqué que les tests présentés avaient été résolus en quelques secondes, aucune mention précise des temps d'exécution du GRASP n'a été introduite. Or, ceci constitue l'une des motivations au développement des métaheursistiques, et des méthodes approchées en générale vis-à-vis des approches exactes telle que la programmation linéaire.

Compte tenu de ces éléments, cette partie a pour objectif de donner une vision claire de la rapidité d'exécution du GRASP proposé. Cependant, notons que ceci est en général difficile à illustrer ; la solution obtenue à partir d'une métaheuristique étant bien souvent le fruit de la réalisation de plusieurs itérations. Ainsi, dans notre cas ont été analysés d'une part les temps nécessaire à la réalisation d'une planification et d'autre part ceux associés à la construction ainsi qu'à l'évaluation d'une solution. De plus, ont été considérés deux types d'instances à savoir une petite et une beaucoup plus importante en l'occurrence, respectivement, la première présentée précédemment et une autre dérivée du problème industriel de la société Michelin. Comme illustré sur le Tableau 15, ce dernier cas correspond, à celui d'un réseau de quatorze usines réparties en Europe et fabriquant plusieurs milliers d'agrégats produits. De plus, dans ce contexte a été considéré un horizon de planification composé de 36 périodes. Notons que, bien entendu, de par sa taille relativement importante cette instance n'a pu être résolue à l'aide du modèle linéaire développé d'où l'absence de comparaisons avec d'éventuels résultats issus du recours à une méthode exacte.

Il convient de remarquer qu'afin de construire ce dernier exemple, seul le nombre d'usines et d'agrégats produits ainsi que les profils de demande correspondent au cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe Michelin. Autrement dit, les valeurs exactes de la demande, des capacités ainsi que des différents coûts sont fictifs. Ceci correspond à une démarche de confidentialité mais répond également à la nécessité d'adapter les différentes données au problème théorique traité dans le cadre de ce doctorat. En effet, comme indiqué dans le premier chapitre, celui-ci ne correspond pas exactement à celui connu par la Supply Chain Tourisme Camionnette Michelin Europe ; des éléments ayant été enlevés et d'autres ajoutés. Aussi, le GRASP présenté dans ce chapitre n'est pas identique à celui réalisé pour cette entreprise, ceci expliquant que certaines données nécessaires à son utilisation aient dû être générées.

Instance	Nombre d'usines	Nombre de ligne de production	Nombre d'agrégats produits	Nombre de famille de standardisation	Nombre de périodes
1	5	10	20	7	12
Michelin	14	>45	>3000	>2000	36

Tableau 15 : Instances utilisées pour l'illustration des temps de résolution

Instance	Durée nécessaire à l'évaluation de la solution initiale (s)	Durée nécessaire à la construction et l'évaluation d'une solution
1 ^{ère} instance	0,016	0,094
Cas industriel	3	39

Tableau 16 : Temps de résolution pour les deux instances tests

Comme indiqué au sein de la partie 3.2 de ce chapitre, la génération d'une solution est constituée, elle-même, de la réalisation de plusieurs itérations. En effet, celle-ci consiste à choisir un ensemble d'agrégats produits P , puis à générer pour ce dernier différentes configurations d'affectation dans le but d'en choisir une ; celles-ci étant systématiquement évaluées par la réalisation d'une planification. Ainsi, afin d'obtenir des durées d'exécutions significatives, le nombre de ces configurations, générées afin d'aboutir à la construction d'une solution, a été fixé à 10. En ce qui concerne le temps d'exécution associé à la réalisation d'une planification, celui-ci a été estimé par le biais d'une évaluation de la solution initiale associée à chacune des deux instances.

A travers l'analyse du Tableau 16, nous pouvons noter que, comme attendu, les temps d'exécution varient énormément en fonction de la taille du problème. Au-delà de cette remarque, nous pouvons constater que ceux-ci sont relativement bons notamment pour le problème industriel. Ce sentiment est d'autant plus prégnant, que le recours à la programmation linéaire ne permet pas de trouver une solution réalisable à ce même problème en 10h00 de temps de calcul. Remarquons que, jusqu'à maintenant, aucune mention n'a été faite des temps de résolution associés à la recherche locale (partie 3.5 de ce même chapitre). En effet, celle-ci est composée elle-même de la réalisation d'un certain nombre d'opérations élémentaires, à savoir l'évaluation de solutions dérivées de la solution courante. Pour rappel, dans ce cas, les modifications considérées

correspondent soit à l'affectation d'un agrégat produit multi-affecté à une unique usine soit à l'annulation d'un changement vis-à-vis de la solution initiale. Par conséquent, nous pouvons noter que les différents éléments indiqués dans le Tableau 16 permettent pleinement leur évaluation. Ainsi, à titre indicatif, la réalisation d'une recherche locale dans le cas d'une solution comportant 100 changements d'affectations et 250 agrégats produits multi-affectés, requiert un temps d'exécution de l'ordre de 12min30 ce qui s'avère relativement faible et, ce, d'autant plus dans un contexte stratégique.

5. Conclusion

La méthode exacte introduite au sein du troisième chapitre ne permettant pas la résolution de problèmes de grandes tailles et, à fortiori d'instances industrielles, une approche de résolution approchée a été proposée au sein de ce chapitre. Plus précisément, a été définie une métaheuristique, en l'occurrence un GRASP. Assez naturellement, ce dernier a été décomposé en différentes étapes, à savoir une phase de construction ainsi qu'une autre d'évaluation dont les algorithmes associés ont été présentés.

Afin d'évaluer la qualité du GRASP ainsi développé, les différentes applications numériques introduites au sein du chapitre 3 ont été à nouveau considérées. Plus précisément, à partir de celles-ci ont été comparés les résultats obtenus à l'issue d'une résolution par l'intermédiaire du modèle linéaire et ceux provenant de la métaheuristique proposée. Cette dernière étape a mis en évidence les écarts apparaissant relativement à l'évaluation des solutions par l'intermédiaire de la réalisation de planifications. Ainsi, les fonctions objectifs données par le modèle linéaire et par le GRASP se sont avérées différées en moyenne de 4% ; la valeur réelle variant assez fortement selon les instances considérées. Comme souligné, ces différences proviennent du caractère « figé » du processus de planification du GRASP ; processus cherchant à s'approcher le plus possible de celui effectivement réalisé au sein même des usines et constituant donc, à ce titre, une méthode pertinente d'évaluation des décisions stratégiques. Cette pertinence est d'autant plus vraie, que, comme indiqué au cours de ce chapitre, cette phase d'évaluation permet de comparer d'une manière fiable les solutions entre elles afin de choisir la meilleure ; ceci constituant l'objectif premier du GRASP proposé.

Partant de ce constat, différentes instances supplémentaires ont été proposées ; celles-ci permettant de démontrer la capacité de la métaheuristique à résoudre des problèmes de grandes taille et, ce, contrairement à la programmation linéaire. Plus précisément, a été illustré le fait que le GRASP proposé permettait, pour des instances comportant plusieurs centaines d'agrégats produits sur plusieurs dizaines de périodes, la construction de solutions de meilleures qualités que les configurations initiales correspondantes. Au-delà de la qualité des solutions obtenues, a également été mis en évidence les faibles temps d'exécution associés. Ainsi, un problème dérivé de celui de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, a été introduit ; problème pour lequel chaque phase de planification ainsi que de construction d'une nouvelle solution a pu être réalisée en quelques secondes seulement.

Ainsi, à travers les éléments mentionnés, ont pu être constatées et justifiées d'une part la pertinence du GRASP et d'autre part sa capacité à résoudre des instances industrielles dans des temps relativement courts et, ce, contrairement à la programmation linéaire. Cependant, il convient tout de même de remarquer que celui-ci ne couvre qu'une partie des attentes relatives à nos travaux de recherche. En effet, cette métaheuristique permet d'adresser uniquement des problèmes dans un cadre déterministe, c'est-à-dire dans lequel l'intégralité des données est connue précisément. Or, comme indiqué dans les deux premiers chapitres, ceci ne correspond pas totalement à la réalité à laquelle sont confrontées bon nombre d'entreprises. Partant de ce

constat, la méthode présentée tout au long de ce chapitre a été intégrée au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo permettant de représenter l'incertitude relative à la demande ; ceci faisant l'objet du chapitre suivant.

Chapitre V : Métaheuristique dans un contexte incertain

Lors du quatrième chapitre, un GRASP permettant de résoudre rapidement des instances de grandes tailles pour le problème ASPDRF a été proposé. Cependant, celui-ci, adressant uniquement des environnements déterministes, a dû être étendu afin de tenir compte de l'incertitude relative à la demande. Aussi, ce cinquième chapitre a pour objectif de proposer un processus de simulation de Monte Carlo basée notre métaheuristique dans le but d'intégrer la notion d'incertitude sur le niveau réel de la demande. Celui-ci est complété par un ensemble d'applications numériques illustrant la capacité de la méthode ainsi construite à appréhender des problèmes de taille importante.

Sommaire

Chapitre V : Métaheuristique dans un contexte incertain	173
1. Introduction	175
2. Intégration du GRASP dans un processus de simulation de Monte Carlo.....	175
2.1. Principe général : la simulation de Monte Carlo	175
2.2. Modification du GRASP pour la prise en compte de l'incertitude relative à la demande	176
2.2.1. GRASP modifié.....	176
2.2.2. Processus de génération des scénarios de demande	177
3. Application numérique	178
3.1. Illustration du fonctionnement du GRASP.....	178
3.2. Mise en œuvre du GRASP dans le cadre de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe Michelin.....	186
4. Conclusion.....	187

Liste des figures

Figure 43 : Moyenne cumulée de la fonction objectif en fonction du nombre de scénarios de demande considérés.....	179
Figure 44 : Evolution du nombre de familles de standardisations affectées à chaque usine .	180
Figure 45 : Evolution de la charge prévisionnelle des usines	181
Figure 46 : Pareto fonction objectif – satisfaction de la demande	184
Figure 47 : Pareto fonction objectif – nombre d’agrégats produits multi-affectés	185
Figure 48 : Pareto nombre de transferts moyens de ressources – nombre d’agrégats produits multi-affectés.....	185

Liste des tableaux

Tableau 17 Caractéristiques de la solution du GRASP vi-à-vis de la configuration initiale dans le cadre d’une demande incertaine	180
Tableau 18 Comparaison des résultats associées aux planification de la production	182
Tableau 19 Valeurs extrêmes associées à la satisfaction de la demande	182
Tableau 20 Valeurs extrêmes associées aux stocks moyens mensuels	183

1. Introduction

Au cours des chapitres précédents ont été présentés une formalisation mathématique, un modèle linéaire ainsi qu'une métaheuristique pour le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) pour le système de production d'une Supply Chain. Bien qu'efficaces, ces différentes méthodes souffrent de leur caractère déterministe. En effet, de par la hausse accrue de la concurrence et une mondialisation des échanges, les entreprises évoluent dans un contexte de plus en plus incertain. Ainsi, il apparaît indispensable de développer des outils capables de tenir compte de cette caractéristique afin de prendre des décisions non pas, seulement, au regard de données prévisionnelles mais en considérant également les potentielles erreurs associées.

Partant de ce constat, ce chapitre a pour objectif de proposer une adaptation de notre GRASP dans le but de tenir compte de l'incertitude relative à la demande. Plus précisément, comme illustré au sein de la seconde partie, celui-ci a été intégré au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo. Malgré cette modification, la métaheuristique ainsi obtenue permet toujours d'adresser des problèmes de grandes tailles, ceci étant illustré à travers une application numérique lors de la troisième partie.

2. Intégration du GRASP dans un processus de simulation de Monte Carlo

2.1. Principe général : la simulation de Monte Carlo

Conformément aux éléments indiqués dans l'état de l'art proposé au sein du second chapitre, la notion d'incertitude a fait l'objet d'un nombre relativement important de recherches et, ce, dans divers domaines. Cette profusion de recherche s'est traduite par la définition et la construction de différentes méthodes dont la simulation de Monte Carlo. Celle-ci, consistant à approcher l'espérance d'une variable aléatoire par la moyenne, est basée sur la loi des grands nombres. La première de ces théories implique que la moyenne d'une suite de n réalisations, indépendantes et suivant la même loi, d'une variable aléatoire tend vers son espérance lorsque n est suffisamment grand. Notons que bien qu'intéressante, cette définition n'est, en pratique, pas facilement utilisable compte tenu de l'imprécision relative à la valeur devant être prise par n afin d'obtenir une moyenne reflétant réellement l'espérance. Dans le but de pallier cette difficulté, il convient d'introduire la notion de théorème central limite. Celui-ci établit que la somme d'une suite de variables aléatoires indépendantes et de même loi converge en loi vers la loi normale. Ceci rend possible le recours à la loi de Student définissant l'intervalle de confiance associé à l'estimateur de l'espérance d'une variable suivant la loi normale et de variance inconnue. Ainsi, l'intervalle de confiance I associé à l'estimateur de l'espérance d'une variable aléatoire est donné par :

$$I = \left[\bar{x} - t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{n-1} \sqrt{\frac{S}{n}}; \bar{x} + t_{1-\frac{\alpha}{2}}^{n-1} \sqrt{\frac{S}{n}} \right] \quad (136)$$

où :

- $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ correspond à l'estimateur de l'espérance (i.e la moyenne) ;

- t_{β}^r correspond au quantile d'ordre β à r degrés de libertés (β reflète le niveau de confiance désiré) ;
- n représente la taille de l'échantillon utilisé afin de calculer l'estimateur \bar{x} ;
- S correspond à l'estimateur non biaisé de la variance ($S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$).

Compte tenu de ces éléments, dans la pratique, le recours à la simulation de Monte Carlo consiste à tirer aléatoirement, suivant une certaine loi, des valeurs pour les paramètres incertains du problème considéré puis à évaluer le résultat obtenu pour une certaine solution s . Une fois le processus réitéré n fois, la moyenne de la fonction objectif associée à cette même solution s peut être évaluée tout comme l'intervalle de confiance correspondant. Si ce dernier s'avère de mauvaise qualité, le processus doit être réitéré avec une valeur n plus élevée tandis que, dans le cas contraire, celui-ci peut à nouveau être mis en œuvre pour une autre solution s' ; le but étant de choisir la meilleure au regard des résultats obtenus.

Conformément aux éléments mentionnés lors de la présentation du problème adressé dans le premier chapitre, les éléments incertains considérés dans le cadre de nos travaux correspondent au niveau de la demande. Ainsi, la mise en œuvre de la simulation de Monte Carlo consiste, dans notre cas, à évaluer chacune des solutions générées sur un ensemble de scénarios de demandes afin d'obtenir un estimateur de l'espérance de la fonction objectif associée. Comme indiqué au sein de la partie suivante, ceci a logiquement nécessité la modification de la métaheuristique développée.

2.2. Modification du GRASP pour la prise en compte de l'incertitude relative à la demande

2.2.1. GRASP modifié

Compte tenu des éléments indiqués au sein de la partie précédente la prise en compte de l'incertitude par le biais de la simulation de Monte Carlo correspond, dans notre cas, au calcul de l'espérance associée à la fonction objectif. Concernant le GRASP présenté dans le chapitre précédent, ceci se traduit uniquement par une modification du processus d'évaluation. En effet, en plus des fonctions relatives à la planification ainsi qu'au calcul d'une fonction objectif, il s'est avéré nécessaire d'en introduire une pour la génération de scénarios de demande. Plus précisément, comme illustré sur l'Algorithme 16 représentant l'algorithme modifié du processus d'évaluation, ceci s'est traduit par l'ajout d'une boucle itérative afin de générer successivement n scénarios de demande et ainsi calculer l'estimateur de l'espérance de la fonction objectif (ligne 23) pour la solution s considérée.

A travers ce paragraphe, nous pouvons constater que l'une des conséquences les plus importantes relatives à la prise en compte de l'incertitude associée à la demande correspond à l'introduction d'une fonction de génération de scénarios sur laquelle il convient de revenir.

Algorithme 16 : Processus d'évaluation d'une solution modifié pour la prise en compte de l'incertitude

Procédure Evaluation(*s*)**Début**

```

1.  pour d=1 à n faire
2.    génération_Scenario_demande()
3.    pour t=1 à nb_Periode faire
4.      gte_A_Produire ← calcul_qtés_A_Produire(t)
5.      ordre_Parcours ← définition_Ordre_Parcours(t)
6.      pour f=1 à nb_Famille_Standardisation faire
7.        inter_F ← ordre_Parcours(f)
8.        pour tout agrégat produit p de inter_F faire
9.          si p ∈ ag_Pdt_Multi_alloués alors
10.           ajout(tab_Multi, p)
11.          sinon
12.            Planification(p, t)
13.          fin si
14.        fin pour
15.      fin pour
16.      pour tout agrégat produit p de tab_Multi faire
17.        Planification(p, t)
18.      fin pour
19.    fin pour
20.    constitution_Stocks()
21.    F(s) ← F(s) + calcul_Fonction_Fitness()
22.  fin pour
23.  F(s) ← F(s) / n
24.  retourner(F(s))

```

Fin

2.2.2. Processus de génération des scénarios de demande

Dans tout processus de modélisation de l'incertitude, la génération des scénarios de données constitue une question relativement importante car influençant la qualité des résultats obtenus. Ainsi, différentes méthodes ont été développées telles que les méthodes d'échantillonnages ou encore la prise en compte d'un nombre fini de scénarios préalablement établis (voir par exemple [Karuppiyah et al., 2010], [Clay and Grossmann, 1997], [Barro and Canestrelli, 2005] et [Hoyland et al., 2003]). Une approche, relativement commune aux processus de simulation et simple à mettre en œuvre, consiste à tirer aléatoirement des données centrées autour d'une valeur nominale et, ceci, selon une certaine loi de probabilité.

Compte tenu de la nature des éléments considérés dans le cadre de nos travaux, nous avons opté pour cette dernière méthode. Ainsi, a été déterminé pour chaque agrégat produit un écart type, pouvant être issu d'un historique des écarts entre prévisions et demandes réelles. Ensuite, pour chacun d'eux et à chaque période, a été tirée, aléatoirement, une valeur selon la loi normale en prenant pour moyenne la demande prévisionnelle associée. Notons que le choix de la loi normale se justifie, dans notre cas, par la considération d'un environnement industriel dans lequel de multiples causes additives et non prévisibles peuvent expliquer la variation de la demande. Celles-ci correspondent, entre autres, aux conditions météorologiques ou encore aux contextes économique et politique.

Partant de ces éléments, l'algorithme de la fonction « génération_Scenario_demande() » peut être simplement exprimé par l'intermédiaire de l'Algorithme 17 Au sein de celle-ci peut être trouvée la variable *demande_Modifiée*. Celle-ci correspond, en effet, à l'expression de la demande à

utiliser dans le cadre du processus de simulation de Monte Carlo en lieu et place de demande. Notons qu'en plus de celui-ci a été également introduite une fonction permettant le calcul de l'intervalle de confiance associé à la fonction objectif. Cependant, celle-ci correspondante simplement à une traduction algorithmique de la formule (136), il n'apparaît pas opportun de la détailler.

Algorithme 17 : Processus d'évaluation d'une solution modifié pour la prise en compte de l'incertitude

Procédure génération_Scenario_Demande

Début

```

1.  pour p=1 à nb_Ag_Pdt_Tot faire
2.    pour t=1 à nb_Période faire
3.      demande_Modifiée[p][t] ← loi_Normale(ecart_Type[p], demande[p][t])
4.    fin pour
5.  fin pour
Fin

```

Bien entendu, la méthode ainsi développée a été évaluée à travers la réalisation d'un certain nombre d'applications dont une illustration, dans un contexte industrielle, est donnée au sein de la partie suivante.

3. Application numérique

3.1. Illustration du fonctionnement du GRASP

L'un des paramètres importants relatifs aux travaux réalisés dans le cadre de ce doctorat est la capacité des méthodes développées à résoudre des instances industrielles. Afin d'illustrer cet aspect, a été repris l'exemple dérivé du cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin introduit au sein de la partie 4.4 du chapitre 4. Rappelons qu'afin de construire cet exemple, seul le nombre d'usines et d'agrégats produits ainsi que les profils de demande correspondent au cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe. Autrement dit, les valeurs exactes de la demande, des capacités, des marges ainsi que des différents coûts sont fictifs. Notons, qu'en plus des éléments considérés au sein de la partie 4.4, différents écarts types, à partir desquels ont pu être générés les scénarios de demande selon le processus décrit précédemment, ont été calculés. Ceux-ci ont été estimés à partir d'historiques de données similaires à ceux connus par la société Michelin.

Dans ce contexte, le test réalisé a consisté à chercher l'affectation produit-usine permettant d'obtenir la meilleure fonction objectif espérée. Cette dernière a été évaluée à travers la réalisation d'un nombre de scénarios de demande n fixé à 150. En effet, à travers l'analyse des résultats obtenus lors de la réalisation d'un premier test visant à déterminer la valeur de ce paramètre, cette valeur a semblé relativement pertinente puisque limitant le nombre d'itérations tout en garantissant l'obtention d'un bon intervalle de confiance pour l'estimateur de l'espérance de la fonction objectif (i.e la moyenne) et, ceci, pour un niveau de confiance de 95%. Ainsi, comme illustré sur la Figure 43, représentant l'évolution de la moyenne cumulée en fonction du nombre de scénarios de demande générés, nous pouvons constater que celle-ci fluctue peu au-delà de 140. Notons qu'afin d'obtenir ce schéma, et dans le but de s'affranchir des effets d'échelles, les différentes fonctions objectif ont été préalablement réexprimées en pourcentage, en prenant pour « base 100 » la valeur de la fonction objectif obtenue vis-à-vis du premier scénario de demande. A travers cette analyse, nous pouvons donc noter que fixer le nombre d'itérations à 150 garantit l'obtention de solutions de bonnes qualités tout en limitant les temps d'exécutions associés.

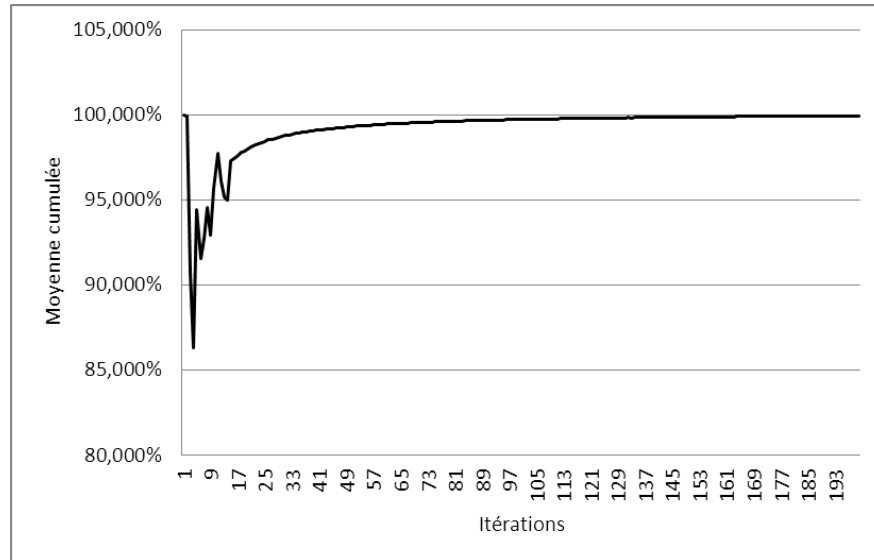


Figure 43 : Moyenne cumulée de la fonction objectif en fonction du nombre de scénarios de demande considérés

Comme illustré au sein du Tableau 17, la meilleure solution obtenue à l'issue de l'utilisation du GRASP présente une fonction objectif espérée améliorant celle de la configuration initiale de 3,22%, la valeur absolue correspondante étant bien au-delà des intervalles de confiances associés. Dans le cadre du jeu de données considéré et dans un cas réel, ceci se traduirait par une hausse du profit sur trois ans de plusieurs dizaines de millions d'euros, ce qui constitue donc une amélioration non négligeable. Cette amélioration est d'autant plus importante qu'elle-ci a été obtenue à partir d'une configuration initiale, déjà de bonne qualité, qui n'a pu être modifiée que d'une manière limitée de par les différentes contraintes considérées.

Concrètement, cette nouvelle solution s'est traduite par la réalisation d'un changement d'affectation pour 1,18% des agrégats produits et une hausse du nombre de multi-affectés de 10%, ceci correspondant à une augmentation de 2,61% du volume de production répartie sur plusieurs entités. Ainsi, contrairement aux exemples présentés dans un contexte déterministe lors de la partie 4.2 du chapitre 3, ici la recherche locale n'a pas conduit à une diminution du nombre total d'agrégats produits multi-affectés. Autrement dit, de par la variation du niveau de la demande, il devient nécessaire de disposer de suffisamment de flexibilité afin d'être à même de garantir un bon taux de satisfaction de la demande et par la même une bonne fonction objectif.

Notons que cette hausse de 10% du nombre d'agrégats produits multi-affectés s'est traduite par une augmentation de 2,61% du volume de production répartie sur plusieurs entités (soit une hausse de plusieurs millions de la demande à satisfaire répartie sur plusieurs usines). Précisons que ce dernier chiffre ne reflète pas les modifications engendrées puisque la hausse ne s'est pas traduite d'une manière homogène pour tous les agrégats produits. En effet, certaines familles de standardisation ont vu leur nombre d'éléments multi-affectés diminuer alors que d'autres l'ont vu significativement augmenter. De la même façon, ces changements ne se sont pas traduits de la même manière selon les usines considérées. Ces différents ajustements proviennent notamment d'un arbitrage entre les produits et les usines vis-à-vis respectivement du chiffre d'affaire et des coûts de production associés.

Evolution de la fonction objectif espérée	+3,22% (*)
Evolution du nombre d'agrégats produits multi-affectés	+9,44%
Nombre d'agrégats produits initialement multi-affectés affectés à une unique usine (% du nombre total d'agrégats produits)	0,00 %
Nombre d'agrégats produits initialement mono-affectés affectés à deux usines (% du nombre total d'agrégats produits)	1,00%
Evolution du volume multi-affecté	+2,61%
Nombre de changements d'affectations réalisés (% du nombre total d'agrégats produits)	1,18%
Evolution du nombre de ressources totales	-5%
(*) : amélioration correspondante à plusieurs dizaines de millions d'euros sur trois ans de par les hypothèses de coûts et de marges prises.	

Tableau 17 Caractéristiques de la solution du GRASP vi-à-vis de la configuration initiale dans le cadre d'une demande incertaine

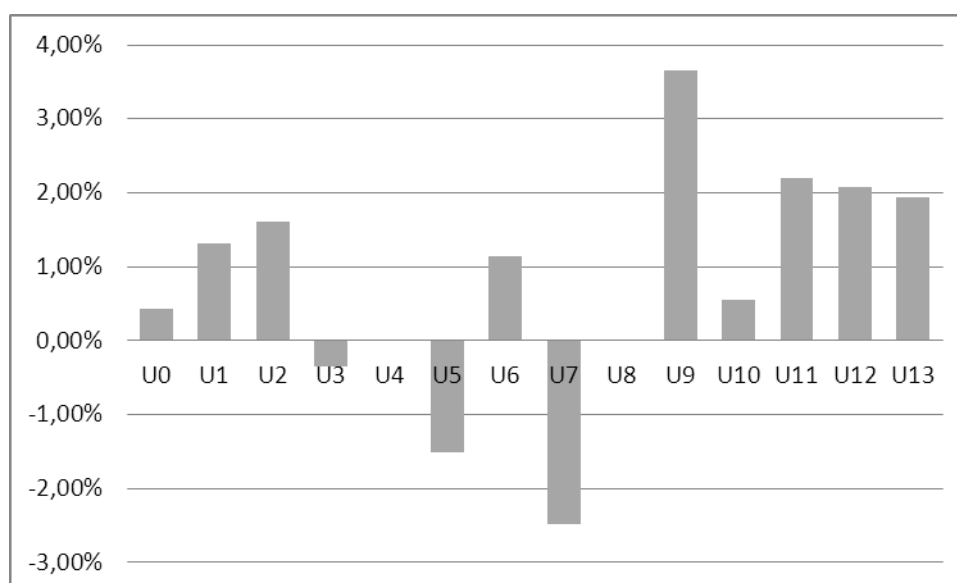


Figure 44 : Evolution du nombre de familles de standardisations affectées à chaque usine

L'impact différent des modifications apportées selon les usines peut être mis en évidence simplement à travers l'analyse de l'évolution de la diversité des productions. Aussi, au sein de la Figure 44 est représentée, pour chaque usine, la variation (en pourcentage) du nombre de familles de standardisations affectées. Notons que, bien entendu, nous considérons qu'une famille de standardisation est affectée à une usine dès lors qu'un des agrégats produit la composant lui est lui-même affecté. Ainsi, nous pouvons constater que la diversité de production a évolué totalement différemment selon les usines considérées. Ceci répond à deux logiques antagonistes, à savoir la volonté de regrouper la production des éléments appartenant à une même famille de standardisation au sein d'une même usine ainsi qu'au souhait de multi-affecter d'avantage

d'agrégats produits afin d'apporter plus de flexibilité au système ; ceci se traduisant de fait par une hausse de la diversité.

Les différents impacts de la nouvelle solution obtenue sur les usines peuvent également être mis en évidence à travers l'analyse des volumes de production affectés. Ainsi, sur la Figure 45 a été représentée l'évolution de la charge prévisionnelle des usines en se basant sur les affectations associées, d'une part, à la configuration initiale et, d'autre part, à la nouvelle solution et en répartissant les prévisions de demande des produits multi-affectés au prorata du nombre d'usines concernées. Ainsi, nous pouvons constater une modification importante, pouvant aller jusqu'à 15%, de la charge des différentes usines, ceci ayant, bien entendu, un impact direct sur la capacité du système à satisfaire la demande ainsi que sur les différents coûts de production associés.

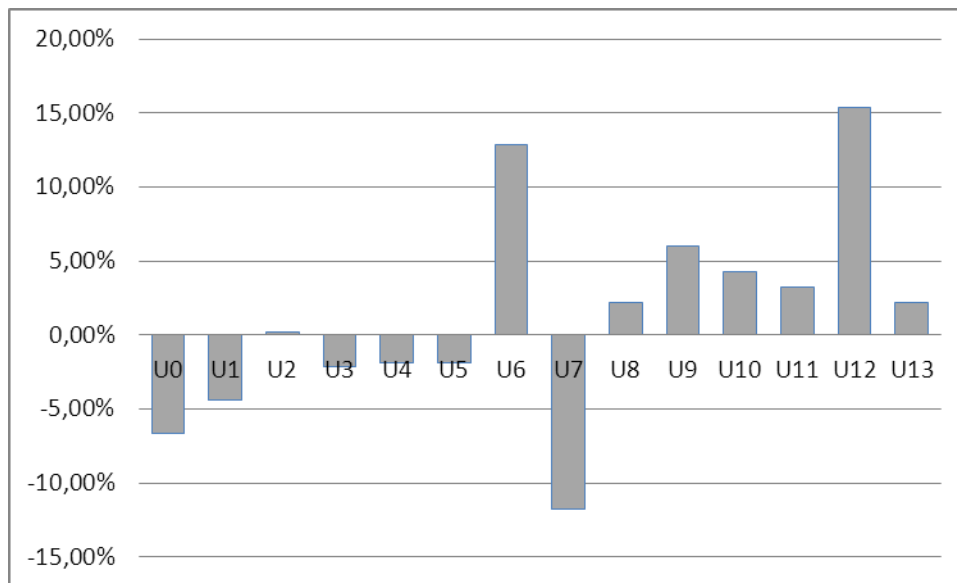


Figure 45 : Evolution de la charge prévisionnelle des usines

Notons que dans le cadre de cette analyse des résultats, il n'est pas opportun de s'intéresser à une quelconque planification ; 150 scénarios de demande ayant été considérés pour l'évaluation de chaque solution ; scénarios de demande à chacun desquels a été associée une planification de la production. Cependant, il convient tout de même de s'intéresser à quelques-uns des paramètres relatifs à la programmation de la production à commencer par la satisfaction de la demande moyenne espérée. Ainsi, comme indiqué au sein du Tableau 18, celle-ci initialement de 92,02% est passée à 93,59% dans le cadre de la nouvelle solution. Cette amélioration de plus de 1,5% peut paraître anodine mais il n'en est rien. En effet, tout d'abord, elle se situe nettement au-dessus des intervalles de confiance associés à la satisfaction de la demande (0,3% pour un seuil de confiance de 95%) si bien qu'elle est significative. De plus, compte tenu des volumes associés, elle se traduit concrètement par une hausse de la demande satisfaite de plusieurs millions sur les trois années considérées.

De par l'analyse de ce même Tableau 18, et toujours dans le cadre de l'étude des résultats relatifs à la planification de la production, nous pouvons noter que le nombre moyen de transferts de ressources réalisés est plus élevé dans le cas de la nouvelle solution que dans celui de la configuration initiale. Ceci est à mettre en correspondance avec deux résultats visibles dans le Tableau 17, à savoir la baisse de 5% du nombre de ressources ainsi que la hausse de la quantité d'agrégats produits multi-affectés. En effet, afin de permettre la production de ces derniers il est indispensable de procéder à des transferts entre les usines concernées.

A ce propos, revenons sur le fait qu'alors même que le volume multi-affecté a augmenté et que la satisfaction de la demande espérée est meilleure, le nombre de ressources a, quant à lui, diminué. Autrement dit, la nouvelle solution apporte un dimensionnement et une utilisation plus efficiente des ressources que la configuration initiale ; ceci ayant, bien entendu, pour conséquence de réduire les investissements associés.

	Satisfaction de la demande moyenne	Nombre de transferts de ressources moyen
Configuration initiale	92,02%	442
Nouvelle Solution	93,59%	482

Tableau 18 Comparaison des résultats associées aux planification de la production

Le fait que la nouvelle solution permette d'obtenir un meilleur taux de satisfaction de la demande que la configuration initiale se retrouve également à travers l'analyse des valeurs extrêmes associées à ce même indicateur. Ainsi, comme indiqué dans le Tableau 19, la plus mauvaise satisfaction de la demande obtenue est plus faible dans le cas de la configuration initiale (91,72%) que dans celui de la nouvelle solution (93,13%). Le même constat peut être dressé concernant la satisfaction de la demande la plus importante (92,68% contre 93,78%). Notons que ces valeurs sont des cas extrêmes et ne remettent pas en cause l'intervalle de confiance de 0,3% associé aux satisfactions de la demande espérées obtenues.

	Satisfaction de la demande		
	Moyenne	Valeur minimum	Valeur maximum
Configuration initiale	92,02%	91,72%	92,68
Nouvelle Solution	93,89%	93,13%	93,78%

Tableau 19 Valeurs extrêmes associées à la satisfaction de la demande

En plus des éléments relatifs à la satisfaction de la demande, il apparaît également important de s'intéresser au niveau des stocks moyens obtenus à l'issue de la réalisation des différentes planifications associées aux scénarios de demande. Ainsi, dans le cas de la nouvelle solution, le volume des stocks moyens mensuels est de 3,76% inférieur à celui de la configuration initiale, ce qui dans un cas réel représenterait une économie de plusieurs dizaines de milliers d'euros chaque mois. D'une manière similaire, les valeurs extrêmes associées à ces mêmes stocks mensuels sont plus faibles dans le cas de la nouvelle solution obtenue à l'aide du GRASP que dans le cas de la configuration initiale. Ces constats peuvent être retrouvés sur le Tableau 20 au sein duquel sont mentionnées les valeurs associées à ces différents paramètres en fonction du volume de stock moyen mensuel associé à la configuration initiale.

	Stock mensuel		
	Moyenne	Valeur minimum	Valeur maximum
Configuration initiale	100%	104%	96%
Nouvelle Solution	96%	100%	93%

Base 100 : Volume moyen mensuel des stocks associé à la configuration initiale

Tableau 20 Valeurs extrêmes associées aux stocks moyens mensuels

Au-delà d'une utilisation classique dans le but de choisir une solution en fonction de la valeur de la fonction objectif, le GRASP peut également être utilisé afin d'en retenir plusieurs dans le but de les analyser par une approche de type « Front de Pareto ». Une telle démarche est opportune dans le cadre de problèmes pour lesquels les solutions obtenues présentent des fonctions objectifs similaires. En effet, dans ce cas il convient, afin d'en choisir une, d'approfondir leurs analyses et, ce, notamment vis-à-vis des différents indicateurs associés que sont la fonction objectif bien sûr mais également la satisfaction de la demande, le niveau des stocks moyens le nombre de changements d'affectation ou encore la quantité de ressources et le nombre moyen de transferts associés. Plus précisément, ces différents indicateurs permettent de qualifier les solutions obtenues vis-à-vis de la satisfaction de la demande, du coût opérationnel moyen (volume des stocks et nombre de transferts de ressources) ou encore par rapport aux investissements associés (nombre de ressources à acquérir et nombre de modifications d'affectation). Ainsi, au-delà de la fonction objectif, le décideur sera à même de privilégier telle ou telle solution en fonction de paramètres extérieurs et de la stratégie financière de l'entreprise quant à l'argent disponible (free cash flow) et le montant des investissements réalisables.

Dans ce contexte de choix d'une solution par l'intermédiaire de la mise en œuvre d'une démarche de type « Front de Pareto », un des premiers éléments à analyser correspond au lien entre satisfaction de la demande et valeur de la fonction objectif ; ceci caractérisant la plus ou moins grande sensibilité des solutions au contexte économique (par l'intermédiaire du niveau de la demande). Ainsi, sur la Figure 46, peut être retrouvé le profil des solutions obtenues vis-à-vis de ces deux indicateurs. Pour ce faire, les valeurs des fonctions objectifs ont toutes été exprimées en fonction de celle de la configuration initiale. Ceci permet, en effet, certes de discriminer les solutions entre elles, mais également de mettre en évidence leur apport vis-à-vis de la configuration de départ ce qui constitue l'un des éléments importants de notre démarche. De plus, cela présente l'avantage de s'affranchir des effets d'échelles.

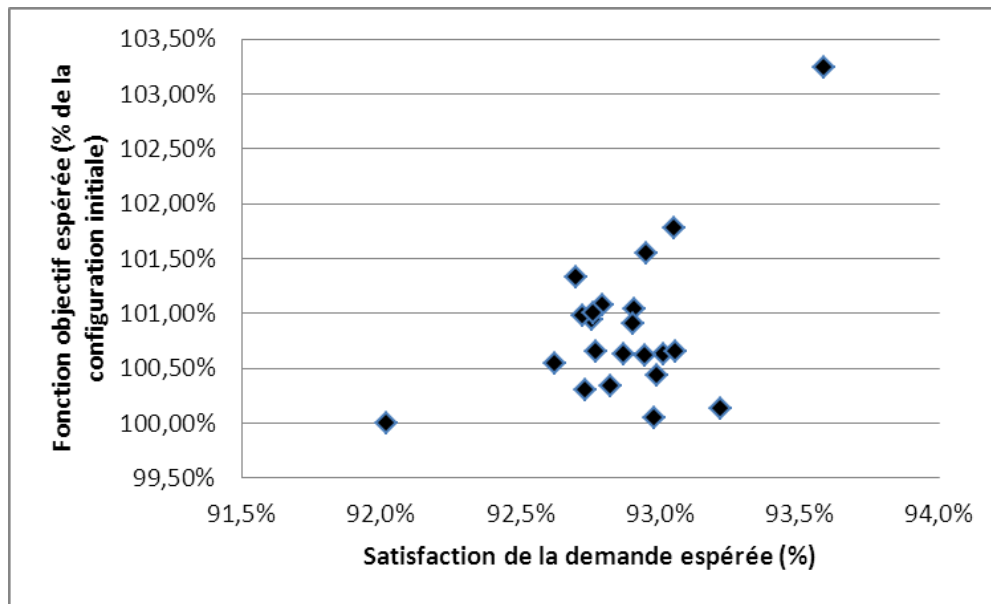


Figure 46 : Pareto fonction objectif – satisfaction de la demande

De par l'analyse de cette figure, nous pouvons constater que les vingt meilleures solutions obtenues dans le cadre de ce test (en plus de la configuration initiale) forment un paysage relativement hétérogène vis-à-vis de la fonction objectif et de la satisfaction de la demande. Ainsi, au-delà de l'analyse de ces solutions, ce schéma permet de dresser un premier constat à savoir le fait qu'il n'y a pas de liens directs entre fonction objectif et taux de satisfaction de la demande. Ainsi, certaines solutions ayant un meilleur taux de satisfaction de la demande que d'autres présentent une moins bonne fonction objectif et vice-et-versa. Notons, tout de même, que la solution associée à la meilleure fonction objectif présente également le meilleur taux de satisfaction de la demande.

Malgré ce caractère disparate des meilleures solutions obtenues, quelques enseignements peuvent tout de même être tirés de la mise en œuvre de cette démarche de type « Front de Pareto ». Ainsi, considérons la Figure 50 représentant le profil des solutions vis-à-vis de la fonction objectif et du nombre d'agrégats produits multi-affectés ; le tout, là-aussi, exprimé en fonction de la configuration initiale. Ainsi, à travers l'analyse de ce schéma, nous pouvons noter que globalement jusqu'à une certaine valeur limite (110%), plus le nombre d'agrégats produits multi-affectés est important plus la valeur de la fonction objectif est grande. Ceci indique donc que jusqu'à ce seuil, le fait d'augmenter le nombre d'éléments multi-affectés se traduit globalement par une hausse de la fonction objectif mais, qu'au-delà, cette hausse entraîne des coûts supplémentaires non couverts par les gains engendrés en terme de chiffre d'affaire, ce qui a pour conséquence de diminuer la valeur de la fonction objectif ou, du moins, de la faire progresser moins vite.

D'une manière similaire, nous pouvons également noter le lien entre quantité d'agrégats produits multi-affectés et nombre de transferts moyens de ressources. En effet, comme illustré sur la Figure 48, plus la quantité d'agrégats produits affectés à plusieurs usines est grande plus le nombre moyen de transferts de ressources est important. Ceci paraît à première vue logique voire même inévitable. En réalité il n'en est rien. En effet, afin de pallier cette hausse du nombre de multi-affectés et dans le but de réduire la quantité de transferts de ressources, une solution serait d'augmenter le nombre total de ces dernières. En effet, ceci permettrait de disposer à chaque période, au sein de chaque usine, d'un nombre suffisant de ressources afin de fabriquer les volumes de production souhaités sans recourir à des transferts. Cependant, à travers ces résultats,

nous pouvons conclure qu'il semble ici préférable de limiter la quantité totale de ressources et, ce, malgré la hausse du nombre d'agrégats produits multiaffectés, quitte à induire d'avantage de transferts.

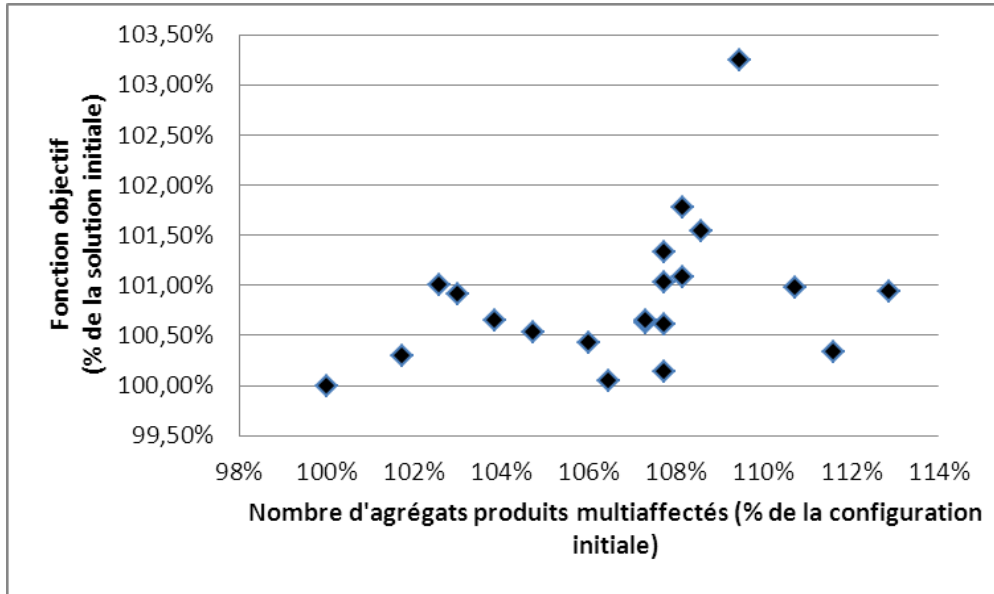


Figure 47 : Pareto fonction objectif – nombre d'agrégats produits multi-affectés

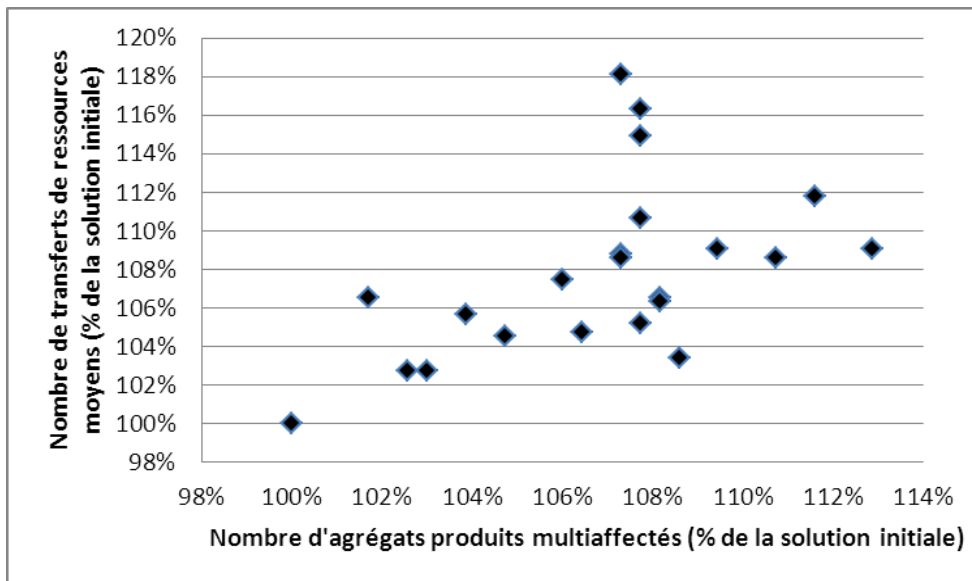


Figure 48 : Pareto nombre de transferts moyens de ressources – nombre d'agrégats produits multi-affectés

Ces différentes analyses présentées, il est important de préciser que les solutions, considérées au sein de ces différents fronts de Pareto, constituent les vingt meilleures obtenues dans le cadre de ce test. Autrement dit, celles de plus mauvaises qualités n'ont pas été analysées puisque non retenues par le GRASP. Par conséquent, les différentes conclusions dressées, et notamment celles concernant le nombre d'agrégats produits multi-affectés, constituent des conditions nécessaires à l'obtention d'une solution de bonne qualité mais non suffisantes. En effet, il est probable que d'autres solutions non retenues présentent également des similarités avec les meilleures alors même qu'elles ont une fonction objectif de mauvaise qualité. Ceci illustre ainsi

le fait qu'une solution d'affectation doit être vue dans son ensemble et non en analysant indépendamment ses différents aspects. Cependant, bien entendu, ceci n'empêche pas de chercher des corrélations entre les différents constituants de la fonction objectif, comme réalisé ici.

A ce stade de la présentation des résultats, il convient également de revenir sur le processus de recherche locale. En effet, lors de la partie 4.4 du chapitre précédent consacrée aux temps d'exécutions des différentes étapes du Grasp, a été indiqué le fait que celui nécessaire à la réalisation de la recherche locale était acceptable et, ce, même dans le cadre de problèmes de grandes tailles. Cependant, il convient de noter que cette remarque n'est plus valable dans le cas d'une approche multi-scénarios. En effet, dans ce contexte, chaque itération de la recherche locale est composée d'une évaluation elle-même constituée de la réalisation d'un ensemble de planifications sur différents scénarios de demande. Or, comme indiqué précédemment, celle-ci consiste à chercher à améliorer la valeur de la fonction objectif par une réduction du nombre Nb_Cb de changements d'affectation vis-à-vis de la solution initiale et du nombre Nb_Mu d'agrégats produits multi-affectés. Autrement dit, la réalisation de la recherche locale dans son intégralité consiste à effectuer $Nb_Cb + Nb_Mu$ évaluations, elles-mêmes constituées d'un ensemble de planifications sur différents scénarios de demande. Ainsi, dans le cas d'un problème de taille relativement importante, tel que celui considéré ici, les temps de résolutions deviennent très importants. A titre illustratif, dans le cas de l'instance considérée au sein de cette partie, la réalisation totale et complète de la recherche locale dans le cadre de la meilleure solution obtenue nécessite, pour un nombre de scénarios de demande de 150, plus de 25h00 de temps de calcul ce qui constitue une durée relativement importante. Par conséquent, il convient de limiter arbitrairement le nombre total d'itérations à réaliser durant les différentes phases de la recherche locale du GRASP.

Comme indiqué lors des deux premiers chapitres, le problème théorique traité dans le cadre de ce doctorat, constitue une extension de celui de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin ; certains paramètres ayant été enlevés et d'autres ajoutés. Aussi, le GRASP présenté au cours de ce chapitre et du précédent ne correspond pas totalement à celui utilisé afin d'adresser la problématique spécifique de cette société. En effet, celui-ci a dû être modifié afin de tenir compte des contraintes spécifiques relatives à ce problème industriel en particulier. Malgré tout, il convient de revenir brièvement sur quelques-uns des résultats obtenus dans ce dernier contexte.

3.2. Mise en œuvre du GRASP dans le cadre de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe Michelin

Comme mentionné lors du premier chapitre, le problème théorique traité dans le cadre de ce document constitue une extension de celui de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin. Plus précisément, certains paramètres tels que le transfert des ressources ou encore les pertes de capacités ont été ajoutés alors que d'autres ont été enlevés, ceux-ci étant spécifiques. Aussi, le GRASP utilisé afin de résoudre le problème industriel de cette entreprise ne correspond pas exactement à celui présenté jusqu'à maintenant. Cependant, il convient de revenir sur les premières conclusions tirées de par son utilisation. Notons que l'intérêt d'introduire une partie de ces enseignements est d'autant plus fort qu'ils concernent un problème industriel réel. Aussi, ils peuvent être facilement généralisés à d'autres cas.

Le recours au GRASP dans le cadre du problème industriel de la société Michelin a répondu à deux objectifs interdépendants. Le premier est constitué de l'évaluation de la qualité de l'affectation des agrégats produits aux usines courante et de l'identification éventuelle de voies

d'améliorations, notamment concernant l'équilibrage charge-capacité des usines au regard de l'incertitude sur la demande. Le second, quant à lui, est associé à l'identification d'une solution alternative de meilleure qualité au regard de la fonction objectif utilisée, celle-ci différant de celle introduite dans le cadre du problème théorique. Afin de satisfaire ces deux objectifs, différents tests ont été conduits amenant à autant de conclusions. Du point de vue spécifique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, celles-ci correspondent, notamment, au fait que l'affectation initiale des productions aux usines était de bonnes qualités. Cependant, notons qu'une meilleure solution a tout de même pu être trouvée.

D'un point de vue général, ces différents tests ont permis de tirer un enseignement important quant à la démarche de réflexion à adopter lors de la recherche d'une affectation des productions aux usines la meilleure possible. Celui-ci correspond au fait qu'une telle solution doit être regardée dans son ensemble et non d'une manière parcellaire. Autrement dit, en général, une solution construite par une addition de caractéristiques d'autres solutions n'offre pas de meilleurs résultats, bien au contraire. Ceci implique que les points positifs d'une configuration d'affectation ne sont pas obligatoirement transposables à une autre. Notons que ceci n'interdit pas la recherche de voies d'améliorations d'une solution, mais impose qu'un tel processus soit réalisé selon la démarche adoptée par notre GRASP ; c'est-à-dire en partant d'une configuration initiale et en limitant le nombre de modifications possibles. A l'inverse, il semble inutile de chercher à générer différentes solutions pour ensuite combiner leur points forts dans le but d'un obtenir une autre de meilleure qualité. Remarquons, qu'à première vue, ces remarques peuvent sembler anodines mais, en réalité, elles définissent une méthodologie de recherche correspondante à la démarche proposée par notre GRASP.

4. Conclusion

Au cours de ce chapitre a été présentée une adaptation de la métaheuristique déterministe, précédemment proposée, pour la prise en compte de l'incertitude relative à la demande. Ainsi, le GRASP a été modifié afin de permettre la mise en œuvre d'un processus de simulation de Monte Carlo. Concrètement, ceci s'est traduit par une évolution de la fonction d'évaluation ; cette dernière consistant alors à effectuer différentes planifications sur autant de scénarios de demande dans le but d'obtenir une estimation de l'espérance associée à la fonction objectif. Ainsi, a dû être également définie une méthode pour la génération des scénarios de demande ; celle-ci consistant à tirer aléatoirement selon la loi normale des valeurs en fonction des demandes prévisionnelles périodiques et d'écarts type associés.

Bien que plus complexe de par la réalisation d'un plus grand nombre d'itérations, la méthode ainsi définie s'avère, comme la précédente, capable d'adresser des problèmes de grande taille. Afin d'illustrer cet aspect, un exemple dérivé du problème industriel de la Supply Chain Tourisme Camionnette Michelin Europe, a été proposé. Ainsi, partant d'une affectation de la production et d'un dimensionnement des ressources initial, a été généré une solution alternative améliorant la valeur de la fonction objectif espérée de plus de 3% ce qui, compte tenu des valeurs considérées, représente plusieurs dizaines de millions d'euros. Cette estimation a été réalisé en considérant, pour chaque itération de la méthode, 150 scénarios de demande ; cette valeur permettant d'obtenir un niveau de confiance très satisfaisant.

Malgré le fait que le GRASP utilisé afin d'aborder le problème spécifique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe du groupe Michelin ne corresponde pas exactement à celui présenté tout au long de ce chapitre, différentes conclusions relatives à l'étude de ce dernier problème ont été mentionnées. Ainsi, a été notamment mis en évidence le caractère holistique d'une configuration d'affectation des agrégats produits aux usines. Ceci traduit le fait qu'une telle

solution ne doit pas être vue comme une somme d'affectations mais dans son ensemble. Concrètement, ceci indique qu'il n'est pas opportun de chercher à obtenir une solution de bonne qualité par la juxtaposition de caractéristiques d'autres configurations. Comme indiqué, ceci valide l'approche développée par le GRASP présenté, à savoir la construction d'une solution à partir d'une configuration initiale tout en limitant le nombre de modifications possibles.

Tout comme les autres travaux présentés, le GRASP proposé porte exclusivement sur la planification long terme du système de production d'une Supply Chain. Or, cette étape ne constitue que le premier échelon des activités de pilotage d'une chaîne logistique. Elle doit être considérée dans un processus global de planification couvrant également les horizons tactique et opérationnel. Notons que ceci suppose d'être à même de pouvoir décliner les décisions prises à un niveau à celui immédiatement inférieur et de prendre, si nécessaire, des mesures correctrices en fonction des nouvelles données marché. Conscient de ces différents aspects, le GRASP présenté au cours des précédents chapitres a été intégré au sein d'un environnement global de planification dont la description est donnée au sein du chapitre suivant.

Chapitre VI : Environnement intégré de planification

Tout au long de ce document a été adressée exclusivement la planification long terme des activités de production d'une Supply Chain. Ceci constituant uniquement l'un des pans du processus de pilotage d'un tel système, nous proposons au sein de ce sixième chapitre un environnement intégré de planification couvrant les horizons stratégiques, tactiques et opérationnels. Ainsi, sont introduits divers modèles permettant d'adresser les différents processus décisionnels associés à ces horizons (réalisation du Plan Industriel et Commercial, définition du Programme Directeur de Production, établissement d'un plan de charge opérationnelle des machines); modèles intégrés au sein d'un processus global de planification permettant de représenter les interactions entre les différents horizons par l'intermédiaire de boucles de faisabilité.

Sommaire

Chapitre VI : Environnement intégré de planification	189
1. Introduction	191
2. Schématisation de l'environnement intégré de planification	191
2.1. Principe général	191
2.2. Schéma global du processus intégré de planification	192
3. Processus de planification stratégique.....	195
3.1. Dimensionnement capacitaire.....	195
3.2. Déploiement capacitaire : dimensionnement de la flexibilité volume et de la mix flexibilité	195
3.2.1. Cas des industries à forte mobilité de la production	196
3.2.2. Cas des industries à faible mobilité de la production.....	199
3.3. Conclusion sur l'étape de planification stratégique.....	207
4. Processus de planification tactique	207
4.1. Démarche de modélisation	207
4.2. Modèle tactique pour la définition du Programme Directeur de Production	208
4.3. Conclusion sur l'étape de planification tactique.....	211
5. Processus de planification opérationnel	212
5.1. Hypothèses et simplification	212
5.2. Modèle linéaire pour l'établissement d'un plan de production court terme.....	214
5.3. Application du modèle de planification opérationnelle.....	218
5.4. Temps de résolution associés à l'étape de planification opérationnelle.....	220
5.5. Conclusion sur le processus de planification opérationnel.....	222
6. Temps de résolution et taille des problèmes considérés	222
7. Conclusion.....	223

Liste des figures

Figure 49 : Schéma de l'environnement intégré de planification	194
Figure 50 : Contraintes relatives au déploiement capacitaire	196
Figure 51 : Application du modèle stratégique de déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à mobilité de la production forte ([Pernot et al., 2013]).....	197
Figure 52 : Processus de simulation de Monte Carlo pour la prise en compte de l'incertitude sur la demande dans le cadre du déploiement capacitaire ([Pernot et al., 2013])	199
Figure 53 : Processus de déploiement capacitaire associée aux industries requérant des investissements de production élevés.....	200
Figure 54 : Erreurs de prévisions et utilisation de la flexibilité	201
Figure 55 : Graphe intermédiaire pour le problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production.....	203
Figure 56 : Graphe pour le problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production	204
Figure 57 : Exemple d'application du modèle de flot dans le cadre de l'évaluation de la flexibilité d'un système de production ([Kemmo et al., 2013])	206
Figure 58 : Graphe flot maximal à coût minimal pour la planification tactique	210
Figure 59 : Exemple de composition d'une ligne de production	213
Figure 60 : Instance associée au premier test du modèle de planification opérationnelle	219
Figure 61 : Résultat associé au premier test du modèle de planification opérationnelle	220

Liste des tableaux

Tableau 21 : Evaluation de la rapidité d'exécution du MILP pour l'évaluation de la flexibilité d'un système de production.....	205
Tableau 22: Evaluation de la vitesse d'exécution du modèle pour la planification opérationnelle	221

1. Introduction

Au cours des chapitres précédents, la planification stratégique du système de production d'une Supply Chain a été vue d'une manière isolée, c'est-à-dire sans intégrer ses différentes interactions avec les processus de décisions moyen et court terme. Partant de ce constat, ce chapitre a pour objectif de proposer un environnement global de planification intégrant, certes, l'horizon stratégique, mais également les horizons tactique et opérationnel. Plus précisément, il s'agit de définir différents modèles facilitant la déclinaison des décisions prises à un niveau à celui immédiatement inférieur ainsi que de permettre la mise en œuvre des boucles de faisabilité garantissant la réalisabilité des éléments décidés sur tous les horizons de planification.

Dans ce contexte, la seconde partie de ce chapitre est consacrée à la définition du fonctionnement de l'environnement ainsi construit et, ce, à travers une schématisation de celui-ci intégrant les différents processus de planification. Ensuite, partant de cette présentation, sont respectivement détaillés, au cours des trois parties suivantes, les modèles et outils développés pour les horizons stratégiques, tactiques et opérationnelles ; ceux-ci étant systématiquement replacés dans le contexte du processus global de planification d'une Supply Chain présenté au sein du premier chapitre (Figure 4).

2. Schématisation de l'environnement intégré de planification

2.1. Principe général

L'environnement global de planification développé repose sur une hiérarchisation des décisions en fonction des horizons associés et, ceci, au-delà des simples découpages opérationnel, tactique et stratégique. Ainsi, ce dernier processus long terme est divisé en deux sous-processus décisionnels distincts à savoir celui relatif au dimensionnement capacitaire et celui associé à la définition des niveaux de flexibilité volume et de mix flexibilité. Par dimensionnement capacitaire, nous entendons le fait de déterminer les investissements (machines, ressources,...) à réaliser ; ceci définissant la capacité maximale des différentes entités du système considéré. De par les délais nécessaires à leur mise en œuvre ces éléments, correspondants par exemple à la construction de nouvelles usines, peuvent être qualifiés de « très long terme ». Ceux-ci contraignent les autres décisions stratégiques constituant pour partie le Plan Industriel et Commercial, que sont le dimensionnement de la flexibilité volume ainsi que de la mix flexibilité. Les premières de ces décisions consistent à déterminer la part des capacités à utiliser « en marche courante » et celles à dédier à la flexibilité volume. Selon le secteur d'activités considéré, ces éléments sont plus ou moins liés avec le dimensionnement de la mix flexibilité à travers l'affectation des produits aux usines. Aussi, sont distingués par la suite deux types d'industries. Le premier correspond aux secteurs d'activités, tels que la construction aéronautique, pour lesquels les décisions d'affectations des agrégats produits aux usines engendrent des investissements conséquents et sont prises dans le cadre stratégique. Le second type d'industrie, à l'inverse, correspond aux entreprises pour lesquelles les affectations peuvent être revues fréquemment et relèvent donc de la planification tactiques ; ceci étant par exemple le cas de la fabrication de textile. Ainsi, afin de tenir compte de leur différence, ces types d'industries font l'objet d'un traitement spécifique au sein de l'environnement global de planification décrit dans cette partie. Précisons que malgré ces caractéristiques spécifiques, dans les deux cas les décisions prises doivent l'être à une maille agrégée. Ainsi, les affectations et les dimensionnements sont réalisés

vis-à-vis d'agrégats produits et d'usines et non en considérant des couples (produits finis, machines).

Comme indiqué lors du premier chapitre, une fois prises, au fur et à mesure de l'avancé dans le temps, ces décisions stratégiques doivent être reconsidérées au niveau tactique. Ceci est le propre de la troisième étape de notre environnement intégré de planification ; celui-ci consistant à la réalisation d'une partie du Programme Directeur de Production (PDP). Notons que ceci suppose, au sein du système de production étudié, de considérer les lignes de production ainsi que les produits finis en tant que tels et non des regroupements de ces derniers ; ceci se traduisant par une déclinaison des décisions stratégiques. Outre, cette phase de déclinaison, de par la prise en compte de contraintes à une maille plus fine (maille « ligne de production » au lieu de la maille « usine ») cette troisième étape a également pour objectif de mettre en évidence d'éventuels problèmes tels que des phénomènes de surcharges ou de sous-charges conséquents. Elle s'inscrit ainsi dans une boucle de faisabilité permettant de valider, ou d'infirmer, les décisions stratégiques en fonction des nouvelles données marché. Aussi, elle peut être le prélude à la prise de mesures correctrices ainsi qu'à la modification des décisions prises au niveau long terme. Compte tenu de ces éléments, ce processus de planification tactique a été distingué, un modèle spécifique lui étant associé.

Toujours dans le cadre des différentes activités d'une Supply Chain, il convient de décliner les décisions tactiques au niveau opérationnel afin de s'assurer de leur faisabilité. Ceci correspond notamment à la réalisation d'un plan de production quotidien, non plus pour chaque ligne de production, mais pour chacune des machines les constituant. Dans ce contexte, la quatrième étape de l'environnement de planification a pour objectif, à partir du PDP, d'établir un plan de charge des machines, constituant les lignes de production considérées, dans le but de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité et ainsi de permettre la prise de mesures correctrices. A ce titre, elle constitue une boucle de faisabilité tactique – opérationnel.

Comme illustré tout au long de cette partie, l'environnement intégré de planification, dont la définition constitue l'objectif de ce chapitre, est constitué de quatre étapes distinctes associées à différents horizons de planification ainsi qu'à différentes mailles décisionnelles. Ces éléments ayant été introduits, il convient de les regrouper au sein d'une représentation graphique afin, notamment, de mettre en évidence leurs liens.

2.2. Schéma global du processus intégré de planification

Un des atouts les plus importants relativement à tout environnement intégré correspond à l'interaction entre les différentes étapes le composant. Cet aspect se réfère tant à la maille des données considérées qu'aux boucles de faisabilité garantissant la pertinence des décisions prises d'un niveau sur l'autre. Ces caractéristiques peuvent être retrouvées sur la Figure 49 reprenant d'une manière graphique les étapes de l'environnement intégré de planification proposé dans ce chapitre.

Ainsi, comme indiqué précédemment, la première étape est constituée des décisions relatives au dimensionnement capacitaire. Celles-ci, sont ensuite reprises, dans la seconde étape, toujours dans le cadre stratégique, afin de définir le niveau de la flexibilité volume. Pour ce faire, deux types d'industries sont distinguées à savoir celles à faible mobilité de la production et celles à forte mobilité. Les premières correspondent à des entreprises pour lesquelles l'affectation des produits aux usines constitue une décision long terme nécessitant des investissements conséquents (entreprises de l'aéronautique, de la construction navale...) tandis que les secondes se réfèrent à celles pour lesquelles elle peut être périodiquement modifiée (industrie textile,...).

En effet, de par leurs caractéristiques respectives, le dimensionnement de la flexibilité volume ne pourra être réalisé d'une manière identique. Ainsi, dans le premier cas, celui-ci ne peut être défini qu'une fois l'affectation des agrégats produits aux usines, et donc également la mix flexibilité, décidés ; ces deux éléments n'étant pas supposés varier pendant une période relativement importante. A l'inverse, dans le second cas, l'affectation peut être périodiquement modifiée ; par conséquent il convient de procéder au dimensionnement de la flexibilité volume non pas en considérant une affectation fixe mais au contraire en intégrant la possibilité de la modifier tout au long de l'horizon de planification. Quel que soit le type d'industrie considéré, ces décisions peuvent conduire à la modification du dimensionnement capacitaire préalablement établi d'où l'introduction des flèches remontantes correspondantes à la boucle de faisabilité interne au niveau stratégique.

Ces différents éléments, définissant la majeure partie du Plan Industriel et Commercial, sont ensuite repris lors de la planification tactique. Ces décisions, initialement exprimées à la maille agrégats produits – usines, sont alors déclinées au niveau produits finis – lignes de production. Ainsi, dans ce contexte, est défini le Programme Directeur de Production, c'est-à-dire une planification moyen terme consistant à décider des quantités de chaque produit à fabriquer sur chaque ligne de production. De plus, est mise en œuvre une boucle de faisabilité consistant à éventuellement remettre en cause les décisions de dimensionnement de la flexibilité ainsi que d'affectation des agrégats produits prises au niveau stratégique.

Afin de s'assurer de leur faisabilité opérationnelle, ces décisions tactiques sont reprises dans la quatrième étape afin d'établir un plan de charge quotidien des machines composant les différentes lignes de production dans le but de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité et, ce, par la prise en compte de contraintes à une maille plus fine (passage des lignes de production aux machines les constituant) ainsi que l'ajustement des demandes prévisionnelles en fonction des nouvelles données du marché (commandes clients, contexte économique,...).

Ce schéma offre une vision globale du fonctionnement et des caractéristiques de l'environnement de planification intégré réalisé. Cependant, bien qu'explicitant les liens existants entre les différentes étapes, il ne permet pas de mettre en évidence leurs caractéristiques propres. Pour ce faire, à chacune de ces phases a été dédiée une partie spécifique, la première étant logiquement consacrée à la planification stratégique.

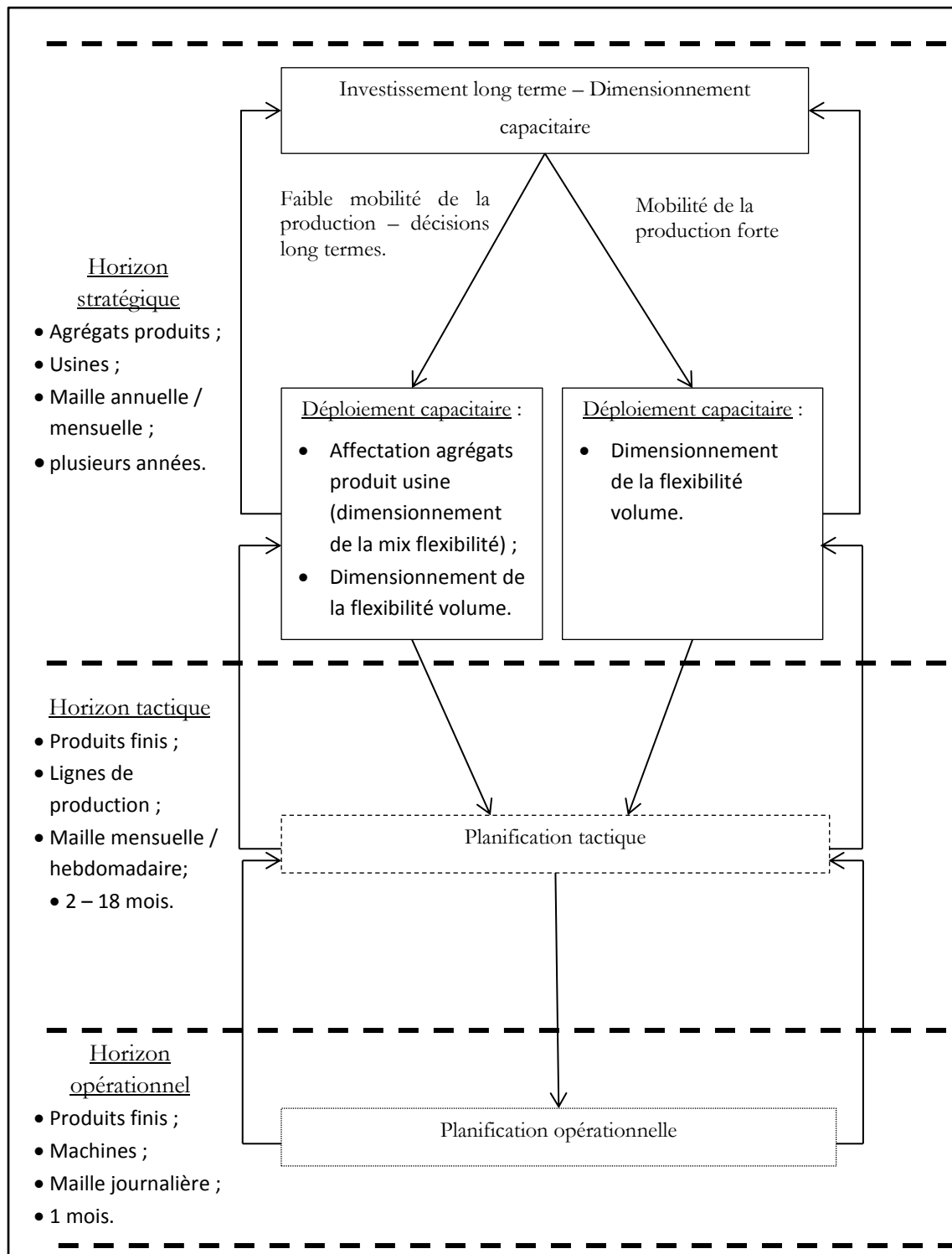


Figure 49 : Schéma de l'environnement intégré de planification

3. Processus de planification stratégique

Les deux premières phases de l'environnement intégré de planification réalisé s'inscrivent dans le contexte stratégique. Cependant, malgré cette caractéristique commune, elles ne couvrent pas exactement le même horizon de planification ; les décisions relatives à la seconde étape étant revues plus fréquemment que celles associées à la première dont elles dépendent.

3.1. Dimensionnement capacitaire

La première étape de l'environnement global de planification correspond au dimensionnement capacitaire des différentes entités du système de production considéré. Celle-ci consiste à décider de nouveaux investissements dans le but de modifier le nombre de produits réalisables au sein de chaque usine. Elles comprennent ainsi des décisions d'ouverture ou de fermeture de sites, la construction de nouvelles lignes de production ou encore leur transformation. De par les coûts engendrés et la durée nécessaire à leur mise en œuvre, ces décisions portent sur des horizons très importants et s'avèrent relativement difficiles à remettre en cause.

De par ces différents éléments ainsi que les contraintes sociales et sociétales associées, ces décisions revêtent un aspect managérial important. Ces paramètres étant difficilement appréhendables et modélisables d'un point de vue mathématique, aucune modélisation ni méthode de résolution spécifique ne leur a été associée dans le cadre de ce document. Cependant celles-ci étant très importantes, elles doivent être pleinement intégrées au sein de cet environnement intégré de planification.

Le dimensionnement capacitaire relève donc pleinement de la planification stratégique. Cependant, celui-ci ne doit pas être considéré au même titre que les autres décisions long terme puisque couvrant des horizons très longs. Il constitue d'ailleurs une contrainte pour la majorité des autres processus stratégiques tel que le déploiement capacitaire.

3.2. Déploiement capacitaire : dimensionnement de la flexibilité volume et de la mix flexibilité

Une fois les capacités maximales des différentes entités définies, il convient périodiquement de déterminer la part de celles à utiliser « en marche courante » et celles à allouer à la flexibilité volume. Ces différentes décisions, regroupées sous le terme de déploiement capacitaire [Volling et al., 2013], doivent être prises au regard de différents paramètres distincts. En effet, la définition de la part des capacités à utiliser quotidiennement se traduit, en fonction de la demande prévisionnelle, par des périodes de surcharges mais également de sous-charges. Ces dernières, entraînant respectivement des pertes de ventes et une hausse du Coût de Revient Industriel (CRI), peuvent être compensées d'une part par la constitution de stocks et d'autre part par le recours à la flexibilité volume. Bien entendu, ces différentes solutions engendrent respectivement des coûts de stockage et des surcoûts de production correspondants, par exemple, à l'embauche d'ouvriers supplémentaires ou encore à la location de ressources supplémentaires. Ainsi, comme résumé sur la Figure 50, le déploiement capacitaire correspond à un équilibre entre chiffre d'affaire issu des ventes, coûts de stockage, coûts de non saturation des capacités et coûts associés à la flexibilité volume.

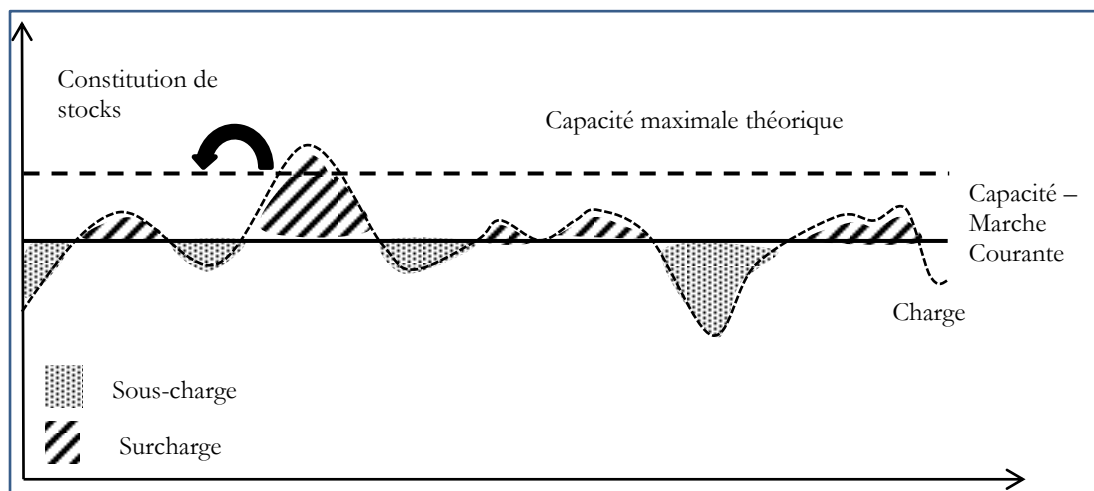


Figure 50 : Contraintes relatives au déploiement capacitaire

Notons que ces décisions peuvent également être plus ou moins impactées par l'affectation des agrégats produits aux usines réalisée ainsi que la mix flexibilité associée. Plus précisément, il convient de distinguer deux types d'industrie à savoir celles pour lesquelles l'affectation des agrégats produits aux usines constitue une décision stratégique long terme difficilement modifiable (entreprises à faible mobilité de la production) et celles, à l'inverse, pour lesquelles les affectations peuvent être périodiquement modifiées sans engendrer de surcoûts trop importants (entreprises à forte mobilité de la production). En effet, dans le premier cas, la définition des lieux de production des différents agrégats produits constitue une contrainte pour le déploiement capacitaire à l'inverse du second.

Partant de ces constats, le problème de déploiement capacitaire a été séparé en deux sous-parties, la première correspondante au cas des industries pour lesquelles les affectations des agrégats produits sont facilement modifiables et la seconde à celles où elles ne peuvent être remises en causes qu'au prix d'investissements coûteux. Ainsi, à chacun de ces cas ont été associés un processus et des méthodes spécifiques présentés au sein des parties suivantes.

3.2.1. Cas des industries à forte mobilité de la production

Un certain nombre d'entreprises, telles que celles de l'industrie textile, propose un portefeuille produits peu diversifié composé d'éléments fabricables sur des moyens de production similaires. A ce titre, le choix de leur lieu de fabrication ne constitue par une décision long terme requérant des investissements trop conséquents mais au contraire des paramètres ajustables périodiquement. Ainsi, lors du déploiement capacitaire, c'est-à-dire la définition de la part des capacités à allouer à la production en marche courante et du niveau de la flexibilité volume, l'affectation des agrégats produits aux usines doit être considérée comme un paramètre ajustable périodiquement et non un élément figé.

Dans ce contexte, nous proposons un modèle linéaire mix en nombre entier (MILP) pour le déploiement capacitaire dans le cadre d'affectations des agrégats produits aux usines modifiables périodiquement. Celui-ci a fait l'objet d'une présentation lors d'une conférence [Pernot et al., 2013]. Ce MILP, consultable en annexe, fait l'hypothèse d'un système de production réalisant un ensemble d'agrégats produits et composé de plusieurs usines. Ces

dernières sont elles-mêmes constituées de différentes lignes de production à chacune desquelles est associée une capacité maximale théorique « $c_{l,t}^{max}$ » (l représentant la ligne de production et t la période) provenant du processus décisionnel précédemment évoqué. Dans ce contexte, le but de notre modèle est de définir la part de ces capacités maximales théoriques à allouer à la flexibilité volume et la part de celles à affecter à la « marche courante ». Notons que pour chaque ligne de production l , cette dernière, est représentée par une variable « $capamax_l$ » ne dépendant pas du temps. Autrement dit, les capacités « marches courantes » sont supposées fixes sur l'ensemble de l'horizon, la différence avec la capacité maximale théorique à chaque période, définissant la valeur de la flexibilité volume.

Partant de ces éléments, l'objectif est de déterminer le déploiement capacitaire maximisant le profit associé au système de production. Ce dernier est exprimé comme la différence entre le chiffre d'affaire issu des ventes et les différents coûts de stockage, de recours à la flexibilité volume ainsi que de non saturation des capacités correspondants à une répercussion de la hausse du CRI. A ces derniers est également adjoint un coût permettant de représenter l'investissement associé à la production d'un agrégat produit sur une ligne de production. Ceci traduit le fait que l'affectation de la production n'est pas figée mais peut être modifiée périodiquement à la condition de payer un coût ; celui-ci représentant l'investissement nécessaire à l'adaptation des machines pour la fabrication de l'agrégat considéré. Ainsi, l'affectation des productions ne constitue pas une décision d'ordre stratégique mais un élément d'ordre tactique ; les agrégats produits étant supposés suffisamment proches pour ne pas nécessiter de ressources spécifiques trop onéreuses et longues à déployer interdisant tout transfert de production entre les usines. Autrement dit, la mix flexibilité du système n'est pas une donnée figée mais un levier supplémentaire afin de satisfaire la demande ; levier dont le coût global doit être mis en concurrence avec ceux relatifs à la flexibilité volume ainsi qu'à la non saturation des lignes de production.

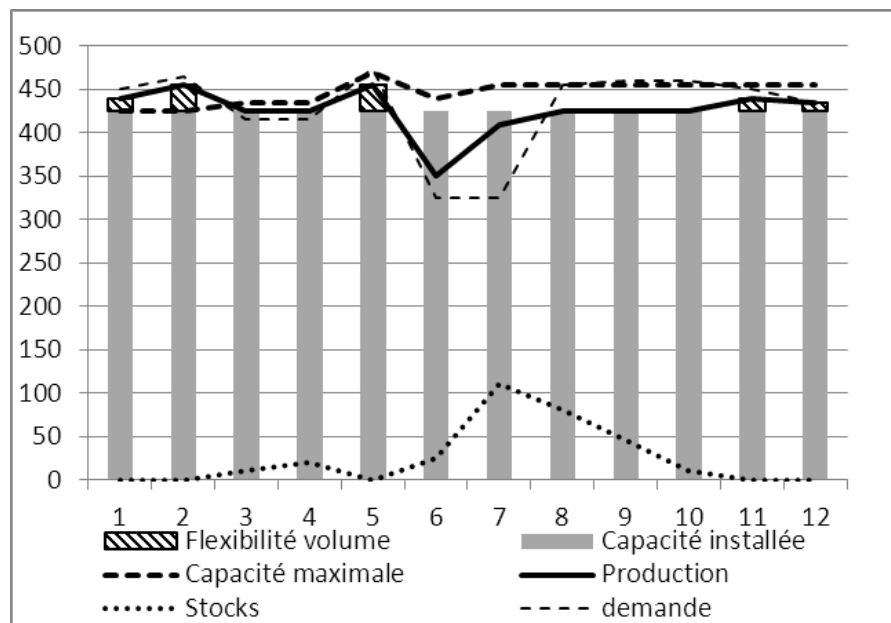


Figure 51 : Application du modèle stratégique de déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à mobilité de la production forte ([Pernot et al., 2013]).

Naturellement, ce modèle a fait l'objet de différents tests dans le but, notamment, d'illustrer son fonctionnement. Par exemple, dans [Pernot et al., 2013] peut être retrouvé un test illustratif correspondant à la résolution d'un problème de déploiement capacitaire dans le cas d'un système

de production composé de 4 lignes de production et fabriquant un ensemble de 10 agrégats produits sur un horizon de 12 périodes. Comme illustré sur la Figure 51, dans ce contexte la capacité installée (pour l'ensemble des lignes de production), correspond au maximum possible c'est-à-dire au minimum, pris sur l'ensemble des périodes, des capacités maximales théoriques. Autrement dit, la solution adoptée vise à minimiser la non saturation des capacités, une telle situation arrivant lors des périodes 6 et 7. A l'inverse, lors des 1, 2, 5 et 11 ; les capacités disponibles ne sont pas suffisantes afin de satisfaire la demande, si bien qu'une partie de la flexibilité volume disponible est utilisée. Nous pouvons également remarquer, sur cette même figure, la constitution importante de stocks en période 7 ; ceci ayant pour avantages de réduire la non saturation des capacités et de limiter le recours à la flexibilité volume lors des périodes suivantes afin de satisfaire la demande.

Le modèle linéaire ainsi construit, traitant le problème stratégique de dimensionnement capacitaire uniquement dans un contexte déterministe, a été adapté afin de tenir compte de l'incertitude sur le niveau réel de la demande. Plus précisément, celui-ci a été intégré au sein du processus de simulation de Monte Carlo résumé par l'intermédiaire de la Figure 52. Celui-ci consiste à évaluer, sur plusieurs scénarios de demande et à l'aide du MILP, différentes configurations de déploiement capacitaire dans le but de choisir la meilleure au regard de la fonction objectif espérée associée. Notons que le fait de ne considérer qu'un ensemble fini *Capa* de scénarios de déploiement capacitaire est tout à fait recevable dans un contexte industriel. En effet, de par des contraintes budgétaires (free cash flow et investissements), le nombre effectif de configurations de déploiement capacitaire envisageables est bien souvent limité. A ceci s'ajoute le fait que les capacités prennent souvent la forme de ressources. Par conséquent, elles ne peuvent évoluer d'une manière continue mais uniquement en prenant des valeurs discrètes correspondantes à des incréments de capacité des machines considérées. Notons que les processus de génération des scénarios de demande ainsi que de définition de leur nombre sont réalisés d'une manière similaire à ceux présentés lors du cinquième chapitre (partie 2.2.2)

Conformément aux éléments mentionnés ci-dessus, cette approche, dont de plus amples explications ainsi que des applications numériques complémentaires peuvent être retrouvées dans [Pernot et al., 2013], fait l'hypothèse d'affectations des productions ajustables périodiquement. Aussi, elle ne peut être utilisée dans le cadre d'industries pour lesquelles le premier lancement de fabrication d'un élément sur une ligne de production requiert des investissements coûteux rentabilisés seulement au bout de plusieurs années.

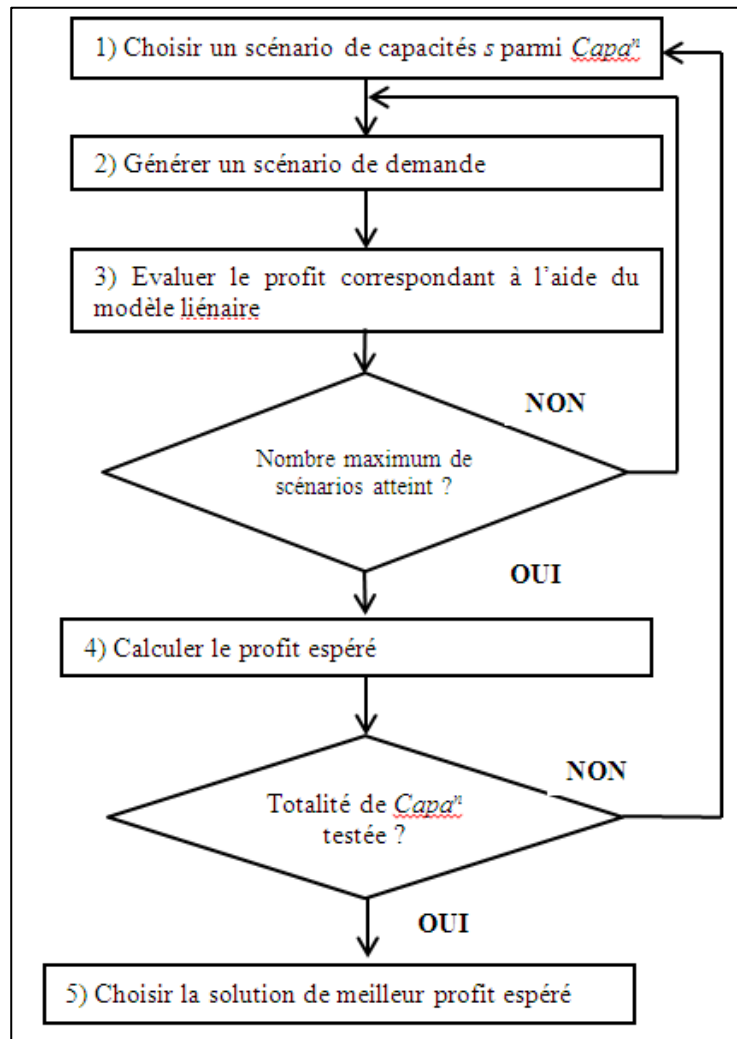


Figure 52 : Processus de simulation de Monte Carlo pour la prise en compte de l'incertitude sur la demande dans le cadre du déploiement capacitaire ([Pernot et al., 2013])

3.2.2. Cas des industries à faible mobilité de la production

3.2.2.1. Principe général

Dans bon nombre d'industries, telles que l'aéronautique et la construction navale, la production d'un élément sur une ligne de production requiert des investissements conséquents ne pouvant être amortis sur de courts intervalles de temps. Ainsi, dans ce cas, l'affectation des agrégats produits aux usines relève d'une décision d'ordre stratégique. Par conséquent, à la différence de la partie précédente, le déploiement capacitaire doit se faire en considérant une affectation des productions fixe et non modifiable périodiquement. Afin d'appréhender ce contexte, correspondant à celui décrit lors des quatre premiers chapitres, un processus spécifique a été défini. Celui-ci visible sur la Figure 53 se base sur le postulat que la flexibilité volume ne permet pas de couvrir l'intégralité des variations de la demande couvertes par la mix flexibilité. En effet, cette dernière permet d'adresser indifféremment des écarts ponctuels et plus long terme entre prévisions et demande. A l'inverse, la flexibilité volume, plus longue à mettre en œuvre ne permet pas de couvrir des variations mensuelles mais uniquement s'étalant sur des horizons de plusieurs mois. Ainsi, le dimensionnement de ces deux types de flexibilité a été décorrélé. Plus

précisément, le processus proposé consiste à choisir un certain dimensionnement capacitaire parmi un ensemble possible (étape 1) ; dimensionnement capacitaire qui rappelons-le correspond à une séparation des capacités maximales, de chaque ligne de production, en une flexibilité volume et une capacité « marche courante ». Ensuite, en considérant uniquement ce dernier type de capacités, le processus consiste à générer une affectation des agrégats produits aux usines (étape 2). Notons que ce dernier point, réalisé en considérant des erreurs de prévisions périodiques, se traduit également par la définition de la mix flexibilité du système de production. Une fois ces éléments définis, la troisième étape consiste à évaluer la capacité du système ainsi construit à réagir à des écarts entre prévisions et demande s'étalant sur plusieurs périodes. Pour ce faire, en plus des capacités marche courante et de la mix flexibilité est également considérée la flexibilité volume. Ceci a ainsi pour conséquence de déterminer si cette dernière s'avère, ou non, bien dimensionnée avant éventuellement de réitérer le processus pour un autre déploiement capacitaire envisagé.

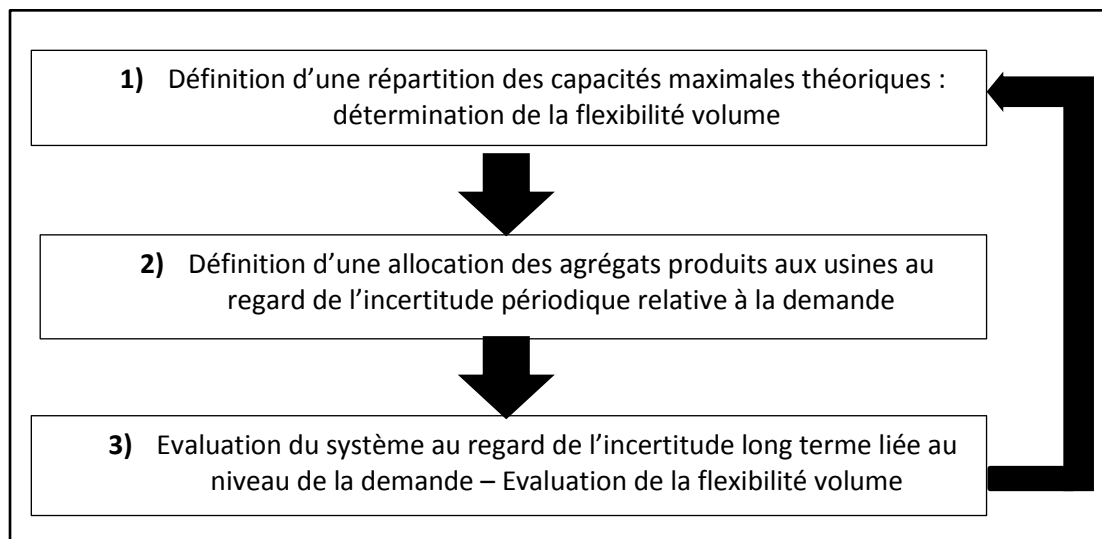


Figure 53 : Processus de déploiement capacitaire associée aux industries requérant des investissements de production élevés

A travers les éléments indiqués au sein des paragraphes précédents, nous pouvons noter les similarités entre l'étape 2 de ce processus et le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDFR) traités précédemment. Ainsi, cette seconde étape est constituée intégralement du GRASP adapté à la prise en compte de l'incertitude relative à la demande présenté lors de la partie 2 du cinquième chapitre. A l'inverse, la troisième étape, d'évaluation de la qualité du système obtenu au regard de l'incertitude long terme, a fait l'objet de travaux spécifiques. Celle-ci prend ainsi la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal comme illustré au sein de la partie suivante.

3.2.2.2. Définition du problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production

Une fois le déploiement capacitaire réalisé lors de la première étape, la seconde phase consiste à effectuer une affectation des agrégats produits aux usines dans le but de maximiser le profit tout en tenant compte de l'incertitude court terme associée à la demande. Cette dernière phase, réalisée par l'intermédiaire du GRASP présenté lors du cinquième chapitre, a ainsi pour objectif de trouver la configuration d'affectation la plus pertinente au regard du déploiement capacitaire choisit. Celle-ci se traduit ainsi par la détermination des lieux de production des

différents agrégats produits et, par voie de fait, par la définition de la mix flexibilité. Une fois ces différentes décisions prises, il convient d'évaluer la configuration du système de production ainsi définie. Plus précisément, il s'avère nécessaire d'estimer la pertinence du déploiement capacitaire choisi et, notamment, du dimensionnement de la flexibilité volume réalisé. Pour ce faire, il est nécessaire de considérer non pas des écarts entre prévision et demande périodiques mais plutôt l'expression d'une incertitude long terme. En effet, comme illustré sur la Figure 54 dans le cadre d'écarts périodiques entre prévisions et demandes, de par sa rapidité de mise en œuvre, la flexibilité utilisée correspond à la mix flexibilité. Par contre, dans le cas d'une tendance de variations s'exprimant sur plusieurs périodes, celle-ci est complétée par le recours à la flexibilité volume plus longue à mettre en œuvre.

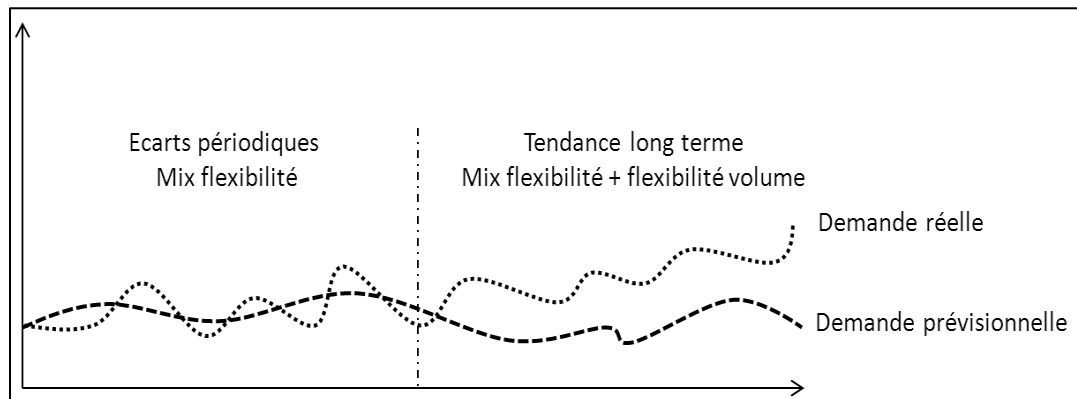


Figure 54 : Erreurs de prévisions et utilisation de la flexibilité

Partant de ce constat, a été construit un modèle mono-période consistant, pour une certaine configuration de flexibilité (mix flexibilité et flexibilité volume) donnée et face à une situation de déséquilibre charge capacité long terme, à définir la valeur maximale de la demande excédentaire pouvant être satisfaite ainsi que la façon d'y parvenir à coût minimum. Notons que le fait de considérer une unique période se justifie par la volonté de tenir compte d'écarts entre prévisions et demandes tendanciels, c'est-à-dire s'exprimant sur des horizons relativement longs. En effet, ces derniers, correspondants à un déséquilibre charge capacité portant sur plusieurs périodes successives, peuvent être représentés par l'intermédiaire d'une unique surcharge ou sous-charge, associée à chaque entité du réseau considéré et couvrant un horizon relativement long.

Ce problème a été précédemment adressé dans [Kemmo et al., 2013]. Dans cet article, nous considérons le cas d'un système de production composé de plusieurs usines elles-mêmes constituées de différentes lignes de production. À chacune de ces dernières sont affectés d'une part la production d'un ou plusieurs agrégats produits et d'autre part un ensemble correspondant à ceux pouvant y être fabriqués et, ceci, en fonction des critères de capacités techniques. Au-delà du dimensionnement de la mix flexibilité résultant, à ces lignes de production sont également affectés une capacité ainsi qu'un niveau de flexibilité volume et des stocks de sécurité propres. Notons, qu'ici, ces différentes données proviennent des décisions prises lors des deux premières étapes indiquées sur la Figure 53. Dans ce contexte, face à une situation de déséquilibre charge-capacité, l'objectif est d'identifier le volume maximal de demande excédentaire pouvant être satisfait ainsi que la configuration permettant de le faire à coût minimum. Par configuration sont entendus l'utilisation de la flexibilité volume, le recours aux stocks de sécurité ainsi qu'à la mix flexibilité ; ce dernier point se traduisant par la réalisation de transferts de volume à produire entre les usines. Les coûts, quant à eux, correspondent à ceux associés à l'utilisation de ces différents leviers de flexibilité. Précisons que celui relatif à la mix flexibilité correspond aux potentiels transferts de ressources nécessaires à la hausse du volume de production associé à un

agrégat produit. De plus, a été introduite une contrainte de rentabilité autorisant le transfert de charge entre deux lignes de production appartenant à deux usines différentes uniquement lorsque le volume associé représente un chiffre d'affaire couvrant les coûts engendrés. Bien entendu, ce volume limite est supposé nul dans le cas de lignes de production situées au sein d'une même usine ; les coûts de transferts étant négligeables.

Partant de ces éléments, a été proposé dans [Kemmo et al., 2013] un modèle sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal dont une présentation est donnée au sein de la partie suivante.

3.2.2.3. Modélisation sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimum du problème d'évaluation de la flexibilité

Le problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production a été modélisé sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal. Un tel problème consiste, comme indiqué au sein de la partie 0 du quatrième chapitre, à considérer un graphe composé de différents sommets, deux étant nommés la source et le puits, reliés entre eux par l'intermédiaire d'arcs auxquels sont associés un coût unitaire et une capacité maximale. Outre le respect de ces dernières, est également définie une autre contrainte imposant que la somme des flots arrivant à un sommet soit égale à la somme de ceux en sortant, exception faite de la source et du puits. Dans ce contexte, l'objectif est de déterminer le flot maximal pouvant circuler entre ces deux derniers sommets ainsi que la configuration permettant d'y parvenir à coût minimum. Par configuration, nous entendons la quantité de flot circulant sur chaque arc tandis que le coût se réfère à celui lié à leur utilisation.

De par la modélisation adoptée, dans notre cas, le flot correspond à la part de la surcharge d'un système de production pouvant être absorbée. Ainsi, la source S a été reliée à d'autres sommets représentant différentes lignes de production et plus précisément différents couples (ligne de production, agrégat produits fabriqué). Ceci offre en effet la possibilité de ne pas modéliser uniquement l'utilisation de la mix flexibilité entre les lignes de production situées dans des usines différentes mais également entre celles implantées au sein d'une même. En fonction de l'expression de la demande, certains couples pourront être surchargés, c'est-à-dire avoir une charge supérieure à leur capacité. Afin de refléter une telle situation, à chaque arc, joignant la source à un couple a été adjointe une capacité équivalente à la valeur de sa surcharge, celle-ci pouvant bien entendu être nulle. Ainsi, tout flot circulant sur l'un de ces arcs représentera la part de la surcharge, du couple considéré, pouvant être absorbée. Afin de parvenir à un tel résultat peuvent être utilisés les stocks de sécurité et la flexibilité volume. Ces leviers ont été représentés par l'intermédiaire de l'introduction de deux sommets supplémentaires auxquels ont été reliés chacun des couples via différents arcs. A chacun de ces arcs ont été associés, d'une part, une capacité maximale équivalente à la quantité d'agréats produits pouvant être fabriquée à l'aide du levier considéré (flexibilité volume ou stocks de sécurité) au sein de la ligne de production associée et, d'autre part, un coût. Ce dernier ne correspond pas au coût de production issu de l'utilisation de la flexibilité mais au surcoût vis-à-vis de la fabrication du même agrégat produit à l'aide des capacités « marche courante ».

Comme indiqué précédemment, en plus de la source S , un second nœud fictif doit être également considéré, en l'occurrence le puits W . A ce dernier sommet, ont été reliés ceux représentant un levier de flexibilité par l'intermédiaire d'arcs de capacités infinies et de coûts nuls. Compte tenu de ces différents éléments, la valeur du flot circulant depuis la source jusqu'au puits correspondra à la part de la surcharge pouvant être absorbée tandis que les arcs empruntés définiront la configuration permettant de satisfaire cette valeur à coût minimum. Une telle

représentation peut être consultée sur la Figure 55, illustrant le graphe ainsi construit dans le cas de quatre couples (agrégat produit, lignes de productions), représentés par la notation (ag_s/l_{ju}) ($i \in \{1,2,3,4\}, j \in \{1,2,3,4\}, u \in \{1,2\}$) où u correspond à l'usine au sein de laquelle appartient la ligne de production j . Notons que sur ce schéma, V^+ représente la flexibilité volume et S^+ les stocks de sécurité tandis que S et W se réfèrent respectivement à la source et au puits.

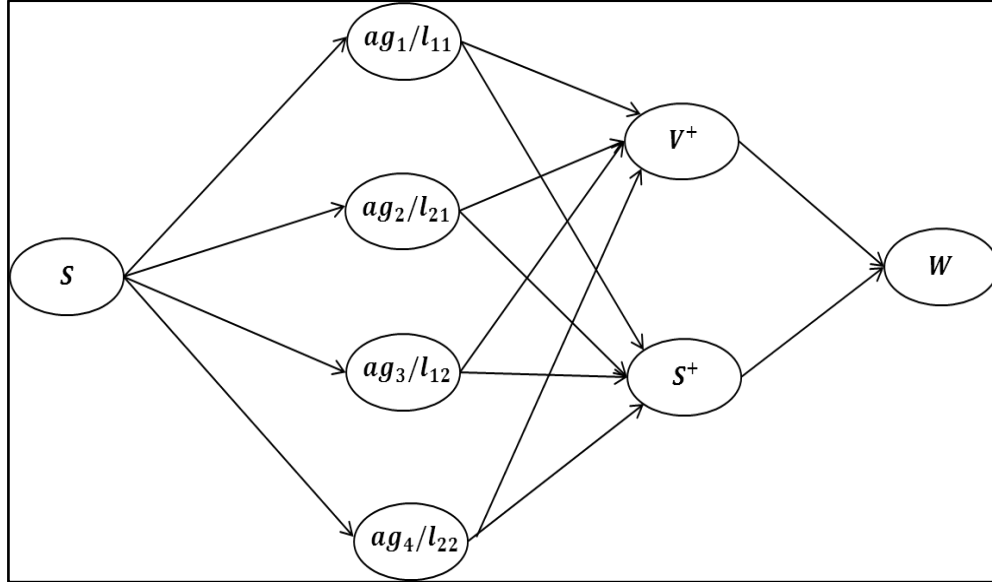


Figure 55 : Graphe intermédiaire pour le problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production

Jusqu'à maintenant, aucune mention n'a été faite de la mix flexibilité. Celle-ci provient des similarités techniques des lignes de production et se traduit par la possibilité d'effectuer des transferts de charge entre ces dernières. Afin de représenter un tel levier de flexibilité, un nœud intitulé « sommet transfert » a été associé à chaque couple et relié à celui-ci par l'intermédiaire d'un arc ayant pour capacité maximale le volume maximal pouvant être transféré vers ce dernier. Dans ce contexte, afin de modéliser un potentiel transfert de charge d'un couple (ag_s/l_{ju}) vers un autre couple (ag_k/l_{hp}) ($i=k$ ou $i \neq k$, $l \neq h$, $p=u$ ou $p \neq u$), un arc partant du premier et allant au « sommet transfert » associé au second est introduit. A celui-ci est associée une capacité infinie ainsi qu'un coût équivalent à celui engendré par la réalisation d'un transfert entre ces derniers. De plus, afin d'introduire une notion de rentabilité, des capacités minimales, constituant des bornes inférieures à tout flot positif, ont été introduites. Autrement dit, sur ces arcs joignant un couple au « sommet transfert » d'un autre couple, le flot doit être nul ou bien supérieur à la capacité minimale associée, cette dernière correspondante au nombre minimal d'agrégats produits à transférer afin d'obtenir un gain issu de leur vente équivalent au coût engendré.

Jusqu'à maintenant, seules les situations de surcharge ont été considérées alors même qu'il se peut que, tout naturellement, certains couples connaissent une sous-charge. Dans ce cas, il convient de considérer la possibilité d'utiliser les capacités ainsi disponibles afin de satisfaire la demande excédentaire provenant d'un autre couple. Afin de représenter une telle caractéristique, chacun de ces derniers a été relié au puits par l'intermédiaire d'un arc de coût nul et de capacité équivalente à la valeur de la sous-charge associée. Bien entendu, dans ce contexte, pour chaque couple, il est impossible d'avoir une capacité non nulle à la fois pour l'arc associé provenant de la source et pour celui allant au puits ; ceux-ci symbolisant respectivement une surcharge et une sous-charge.

Afin de mieux appréhender les différents éléments relatifs à la construction du graphe, nous renvoyons le lecteur intéressé vers [Kemmo et al., 2013] ainsi qu'à la Figure 56 illustrant la modélisation de ce problème dans le cas d'un système de production constitué de quatre couples (ag_i/l_{ij}) où i représente le numéro de l'agrégat produit, j celui de la ligne de production et u l'usine à laquelle elle appartient. Sur ce graphe, les deux premiers couples (ag_1/l_{11}) et (ag_2/l_{21}) correspondent donc aux deux lignes de productions de la première usine et (ag_3/l_{12}) , (ag_4/l_{22}) , à celles situées dans la seconde. Ce schéma fait l'hypothèse de transferts de charges pouvant être effectués uniquement entre la seconde ligne de production de la première usine et la première de la deuxième. Aussi, seuls les « sommets transferts » st_2 et st_3 associés à celles-ci ont été représentés.

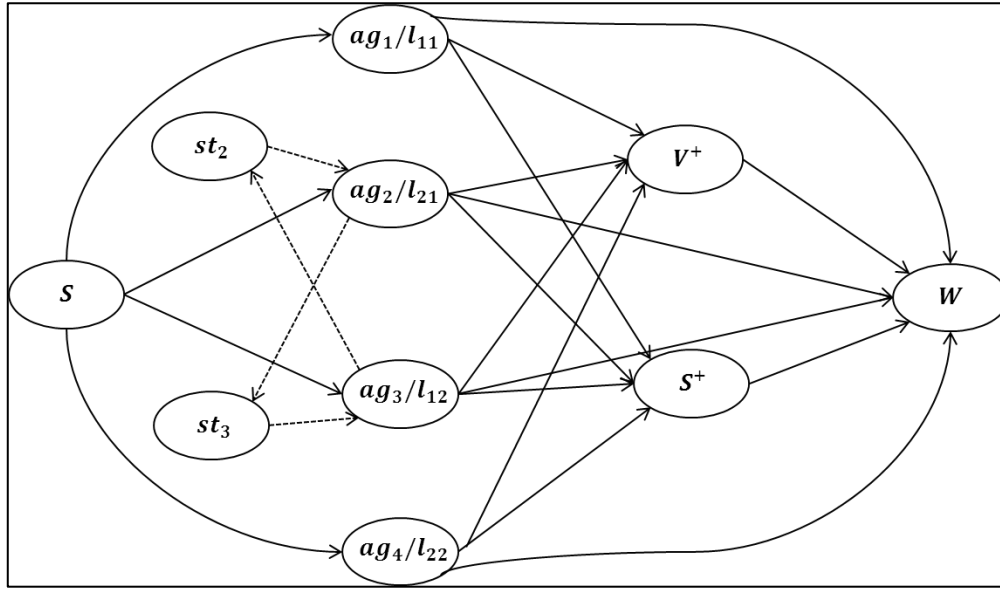


Figure 56 : Graphe pour le problème d'évaluation de la flexibilité d'un système de production

Classiquement, les problèmes de type graphe flot maximal à coût minimal sont résolus à l'aide de l'algorithme de Busacker et Gowen. Cependant, dans notre cas, cette utilisation n'est pas envisageable de par le caractère particulier des capacités minimales introduites. Aussi, lui a été préférée l'utilisation de la programmation linéaire comme indiqué au sein de la partie suivante.

3.2.2.4. Résolution du modèle de flot pour l'évaluation de la flexibilité

Afin de résoudre la modélisation introduite précédemment, un modèle linéaire mix en nombre entier (MILP) a été construit. Ce modèle, présenté dans [Kemmo et al., 2013] et consultable en annexe, correspond à un MILP en deux étapes. La première consiste, au regard des différentes contraintes introduites précédemment, à déterminer le flot maximal pouvant circuler de la source au puits. Une fois cette valeur déterminée, la seconde étape consiste, quant à elle, à trouver parmi toutes les configurations capables de la satisfaire, celle permettant de le faire à coût minimum. Par configuration, nous entendons la valeur du flot circulant sur chacun des arcs.

De par sa structure particulière, exploitant des spécificités des problèmes de flots, le MILP ainsi construit s'avère capable de trouver la solution optimale et, ce, même dans le cadre de problèmes de grandes tailles. Ainsi, dans [Kemmo et al., 2013] a été conduite une série de tests afin d'évaluer la rapidité d'exécution de ce modèle dans le cadre d'instances de grandes tailles ; tests dont les résultats peuvent être retrouvés au sein du Tableau 21. Dans celui-ci, Nag représente le nombre d'agrégats produits considérés, Nma le nombre d'agrégats produits

fabriqués au sein de deux lignes de production, N_u le nombre d'usines, N_p le nombre de lignes de production, N_c le nombre de couples dans le graphe correspondant, N_s le nombre de sommets, N_a le nombre d'arcs, N_v le nombre de variables dans le MILP associé, N_c^{max} le nombre de contraintes dans la première étape du MILP, N_c^{min} le nombre de contraintes dans la seconde étape, T^{max} le temps de résolution associé à la première étape et T^{min} celui relatif à l'obtention d'une solution optimale pour la seconde étape. De par l'analyse de ce tableau, nous pouvons constater que la modélisation proposée permet de résoudre des problèmes de grandes tailles. Ainsi, la dernière instance, correspondante au cas d'un système de production, composé de 600 agrégats produits (200 étant fabriqués au sein de deux lignes de production) et de 10 usines, se traduisant par un MILP contenant plus d'un million de variables et de contraintes, a pu être résolue en moins de deux minutes. Plus précisément, la solution optimale relative au problème de maximisation du flot, constituant la première étape du MILP, a pu être obtenue en 35 secondes et celle associée au problème de minimisation des coûts, correspondante à la seconde étape, en 74 secondes.

Taille du problème				Structure du graphe			Taille du MILP			Temps de résolution (s)	
N_{ag}	N_{ma}	N_u	N_p	N_c	N_s	N_a	N_v	N_c^{max}	N_c^{min}	T^{max}	T^{min}
3	1	2	2	4	12	38	54	64	65	0,00	0,00
30	20	2	4	50	104	2 752	5 252	5 354	5 355	0,05	0,07
75	15	4	15	100	204	10 502	20 502	20 704	20 705	0,20	0,43
300	50	6	25	400	804	162 002	322 002	322 804	322 805	3,92	6,03
400	100	8	30	600	1 204	363 002	723 002	724 204	724 205	11,94	21,64
600	200	10	40	800	1 604	644 002	1 284 002	1 285 604	1 285 605	35,36	74,29

Tableau 21 : Evaluation de la rapidité d'exécution du MILP pour l'évaluation de la flexibilité d'un système de production

D'une manière générale, rappelons que les temps d'exécution, reportés dans le Tableau 21, correspondent bien à la durée nécessaire à l'obtention d'une solution optimale, à l'aide du solveur Cplex pour les différents tests considérés, et non d'une solution approchée. Cette série d'applications numériques illustre donc bien la capacité du modèle développé à résoudre des instances de grandes tailles.

A ce stade de la présentation de la modélisation réalisée, il convient d'insister sur le fait que, comme indiqué précédemment, la structure des graphes construits est totalement dépendante des problèmes considérés. En plus du nombre de sommets et d'arcs associés, illustré par l'intermédiaire du Tableau 21, cet aspect se retrouve également dans la définition des capacités des différents arcs. Ainsi, à titre illustratif, a été reportée sur la Figure 57, une application de cette modélisation dans le cadre de l'évaluation de la flexibilité d'un système de production. Cet exemple, tiré de [Kemmo et al., 2013], correspond au cas d'un système de production constitué de deux usines et fabricant quatre agrégats produits. D'une manière similaire aux figures introduites précédemment, la notation (ag_p/l_m) symbolise le couple relatif à l'agrégat produit i et la ligne de production l située au sein de l'usine u tandis que V^+ se réfère à la flexibilité volume, S^+

aux stocks de sécurité, S à la source et W au puits. Notons que sur cette figure, a également été attribué un numéro à chaque sommet (chiffre situé au-dessus de chaque nœud). À ce système de production sont associés un certain déploiement capacitaire ainsi qu'une situation de surcharge, ces éléments se traduisant par la définition des capacités maximales des différents arcs (première valeur). Ainsi, par exemple, compte tenu des indications précédentes, le premier couple présente une surcharge de 2000 (valeur de la capacité maximale de l'arc $(1,2)$) et par conséquent aucune sous-charge (capacité maximale de l'arc $(2,10)$ nulle), une flexibilité volume équivalente à la production de 1000 produits (capacité maximale de l'arc $(2,8)$) et des stocks de sécurité de 50 (capacité maximale de l'arc $(2,9)$). En plus de ces éléments, sur chaque arc est également indiquée la valeur du flot correspondante à la résolution du MILP, en deux étapes associée, à l'aide du solveur Cplex. Ainsi, toujours dans le cas du premier couple, seulement une partie de la surcharge a pu être absorbée (arc $(1,2)$ non saturé). Ceci a été réalisé par l'utilisation pleine et entière de la flexibilité volume et des stocks de sécurité (arcs $(2,8)$ et $(2,9)$ saturés).

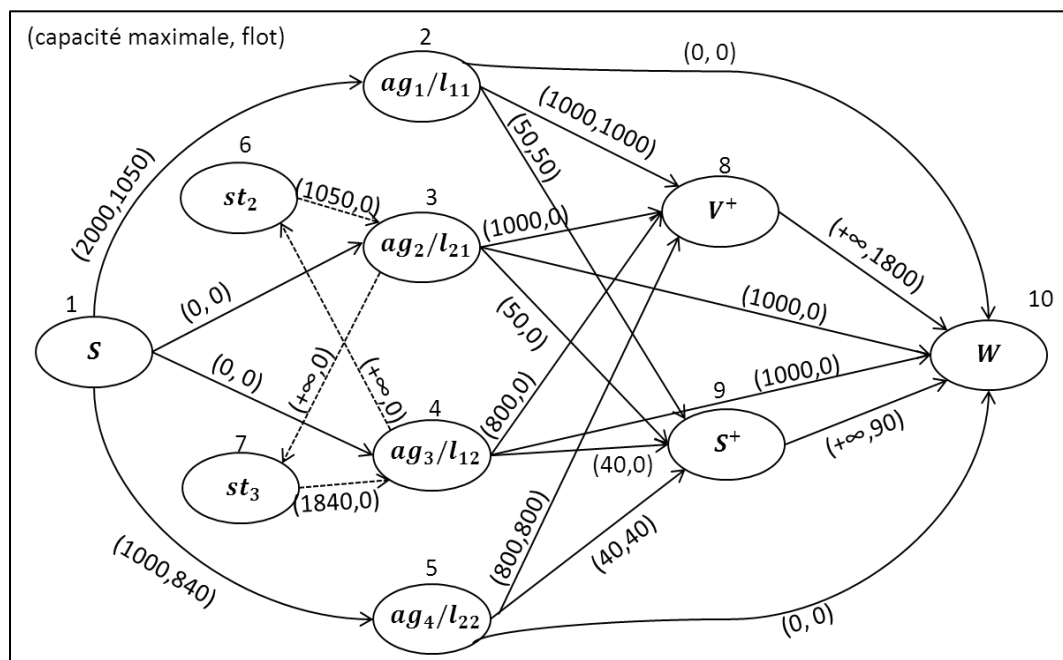


Figure 57 : Exemple d'application du modèle de flot dans le cadre de l'évaluation de la flexibilité d'un système de production ([Kemmo et al., 2013])

À ce stade de la présentation de cette modélisation, pour laquelle de plus amples explications peuvent être retrouvées dans [Kemmo et al., 2013], il convient de remarquer que jusqu'à maintenant a été considéré un environnement purement déterministe. Ainsi, afin de tenir compte de l'incertitude associée à la demande, ce modèle doit être intégré au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo en tout point similaire à celui évoqué dans la partie précédente. Ainsi, chacune des configurations testées, résultantes des deux premières étapes de la Figure 53 (répartition des capacités maximales disponibles et affectation long terme de la production), doit être évaluée sur différents scénarios de demande dans le but d'estimer le profit espéré associé. Notons que dans ce cas, chaque scénario de demande, dont le nombre total est donné par l'équation (136), est directement traduit en une situation de déséquilibre charge-capacité en fonction des capacités maximales des différentes lignes de production considérées. Chacune de ces situations de déséquilibre est alors ensuite, elle-même, transcrite sous la forme d'un graphe par l'intermédiaire de l'attribution de valeurs aux différentes capacités.

Maintenant que ces éléments ont été présentés, il convient de les replacer dans la démarche de déploiement capacitaire représentée sur la Figure 53. Ceux-ci correspondent à la dernière étape

et constituent la phase d'évaluation d'un système de production et, ceci, à l'inverse des deux premières correspondantes à sa construction. Ce processus global ayant pour but de définir le meilleur déploiement capacitaire doit être réitéré plusieurs fois afin, au final, de choisir la meilleure solution c'est-à-dire celle présentant le meilleur profit espéré. Notons que, conformément au graphe de la Figure 49, à l'issue de cette étape peut également être décidée une remise en cause du dimensionnement des capacités maximales théoriques (boucle de faisabilité). Dans, ce cas, en fonction des budgets disponibles et du profit long terme espéré, pourront être décidés des investissements visant, par exemple, à aménager certaines lignes de productions, à ouvrir d'autres usines ou, à l'inverse, à en fermer, le tout en fonction de la stratégie long terme de l'entreprise.

3.3. Conclusion sur l'étape de planification stratégique

Quel que soit le type d'industrie considéré, à l'issue de cette étape de planification stratégique de l'environnement intégré de planification proposé, est obtenu un ensemble de décisions similaires correspondantes à la définition des capacités maximales disponibles ainsi qu'au déploiement capacitaire. Ce dernier est constitué de la définition du niveau de la flexibilité volume et des capacités « marche courante » ainsi que, en fonction du type d'entreprise considéré, de la mix flexibilité à travers l'affectation des différents agrégats produits aux usines.

Une fois ces décisions stratégiques déterminées, celles-ci doivent être déclinées à la maille tactique au fur et à mesure de l'avancé dans le temps. Cette étape se traduit, notamment, par la définition d'une planification de la production pour laquelle a été construit un modèle spécifique présenté au sein de la partie suivante.

4. Processus de planification tactique

Au fur et à mesure de l'avancé dans le temps, les éléments décidés au niveau stratégique doivent être affinés afin de pouvoir être mis en œuvre. Ceci est le propre de la planification tactique. Sa réalisation suppose de décliner les décisions long termes à une maille appropriée afin, éventuellement, de les remettre en cause tout en tenant compte des nouvelles données du marché. Dans ce contexte, à cette étape de l'environnement intégré de planification, sont considérés non plus des agrégats produits mais des produits finis ainsi que des lignes de production. Ceci suppose donc d'avoir procédé à une désagrégation des affectations initiales à une maille plus fine. Partant de ces éléments, la planification tactique consiste alors à établir les quantités de chaque agrégat produit à fabriquer, sur chaque ligne de production lors de chaque période de l'horizon de temps considéré, mais, également, à définir le niveau d'utilisation des différentes capacités et des leviers de flexibilité.

4.1. Démarche de modélisation

Dans le cadre de notre environnement intégré de planification, le propre de la planification tactique est de réaliser la majeure partie du Plan Directeur de Production (PDP) décrit par l'intermédiaire de la Figure 4. Ainsi, elle consiste à effectuer la planification de la production à partir des décisions long terme et en fonction des nouvelles données du marché. Ceci suppose donc de respecter les différentes affectations des agrégats produits ainsi que dimensionnements décidés au niveau stratégique.

Compte tenu de ces éléments, préalablement à l'utilisation du modèle de planification présenté au sein de la partie suivante, doit être réalisée une étape de déclinaison des décisions. Concrètement, celle-ci consiste à affecter la fabrication des produits finis aux usines, en accord avec les affectations décidées précédemment à la maille agrégat produit. Notons qu'une telle désagrégation, couplée avec la notion de capacité technique, permettra de déterminer, pour chaque produit fini, la liste des lignes de production pouvant le fabriquer tout en respectant les décisions prises au niveau stratégique. De plus, il convient également de remarquer que dans le cas de produits finis appartenant à des agrégats multi-affectés, il conviendra de mesurer l'opportunité de les placer dans une ou plusieurs usines. Cependant, un tel choix n'est pas crucial dans la mesure où le processus de planification de la production décrit au sein de la partie suivante peut pallier d'éventuels déséquilibres engendrés. De plus, notons que, compte tenu des affectations décidées au niveau stratégique, des niveaux de pertes de capacités, issues des lancements de production associés aux différentes lignes de production, pertinents au niveau tactique pourront être estimés. Aussi, les capacités considérées sont déduites de ces pertes et intègrent le dimensionnement des ressources préalablement décidés.

Précédemment, avaient été construits deux sous-processus de déploiement capacitaire, adaptés chacun à un type d'industrie, en l'occurrence celui correspondant aux entreprises à faible mobilité de la production et celui aux entreprises pour lesquelles les affectations de la production peuvent être revues périodiquement. Dans le cadre de l'étape de planification tactique de notre environnement intégré, seul un modèle a été construit afin d'adresser ces deux contextes. Celui-ci prend la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal, comme présenté au sein de la partie suivante.

4.2. Modèle tactique pour la définition du Programme Directeur de Production

La modélisation adoptée afin de résoudre le problème de planification tactique est dérivée de celle introduite au sein de la partie 3.2.2.3 de ce même chapitre. Celle-ci est basée sur des travaux préalablement réalisés ([Artiba et al., 2011]) ; aussi nous renvoyons le lecteur vers cet article pour obtenir des informations complémentaires à celles données ci-dessous.

D'une manière similaire au processus d'évaluation de la flexibilité d'un système de production décrit au sein de la partie 3.2.2.3 de ce même chapitre, celui relatif à la planification tactique a été modélisé sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal. Cependant, dans ce cas, n'ont pas été considérés des couples (agrégats produits, lignes de production) mais (produit fini, période) pour chacun desquels a été introduit un sommet spécifique. A chacun de ces derniers a été associé un arc de coût nul provenant de la source et ayant pour capacité maximale la demande associée, c'est-à-dire celle du produit fini considéré lors de la période considérée. Ensuite, chacun de ces sommets a été relié à un ou plusieurs autre(s) nœud(s) représentant chacun une ligne de production différente lors de la même période. Notons que la création de ces arcs a répondu à deux règles mentionnées ci-dessous.

- (i) Pour chaque période, chacun des couples a été relié à l'ensemble des lignes de production situées dans la ou les usine(s) auxquelles le produit fini associé a été affecté et ayant la capacité technique de le fabriquer. Rappelons que cette affectation provient de la déclinaison de celles réalisées à la maille agrégat produit lors de la planification stratégique. Les arcs ainsi introduits se sont vus attribuer une capacité infinie et un coût unitaire correspondant à celui de la production d'une unité du produit fini en question sur la ligne de production considérée. Notons que

le fait que certains couples soient reliés à des lignes de production associées à différentes usines correspond à la mix flexibilité du système.

- (ii) Dans un second temps ; chaque couple (produit fini, période) a été éventuellement relié à un ou plusieurs autres sommets représentant, pour la même période, d'autres lignes de production compatibles, c'est-à-dire non situées au sein des usines auxquelles l'agrégat produit est affecté mais ayant tout de même la capacité technique de le fabriquer. Cependant, dans ce cas, les arcs correspondants se sont vu affecter une capacité minimale égale au nombre minimum de produits à fabriquer afin de justifier les investissements nécessaires à la production d'un élément au sein d'une usine à laquelle il n'était pas initialement affecté. A ces arcs a également été adjoint un coût constitué de deux composantes à savoir le coût de production mais également une pénalité importante relative à la modification de l'affectation initialement proposée.

Compte tenu des éléments indiqués jusqu'à présent, le flot circulant dans le graphe permet de représenter la quantité de chaque produit fini fabriqué lors de chaque période au sein de chaque ligne de production. Cependant, aucune notion de contraintes capacitaires n'a été introduite. Afin de représenter cet aspect, chaque sommet relatif à une ligne de production a été relié à un autre nœud intitulé « capacité » par l'intermédiaire d'un arc de coût nul et de capacité maximale équivalente à celle de la ligne de production considérée lors de la période associée. D'une manière similaire, un autre nœud a été introduit afin de représenter la notion de flexibilité volume. Celui-ci a été relié à chaque sommet, représentant une ligne de production, par l'intermédiaire d'un arc de capacité équivalente au nombre total de produits finis pouvant être fabriqués à l'aide de la flexibilité volume associée. A la différence des précédents, ces arcs se sont vu affecter un coût unitaire équivalent au surcoût de production engendré par le recours à la flexibilité volume. Notons qu'ici, est bien considéré un surcoût, le coût de production « normale » étant déjà introduit par l'intermédiaire des arcs liant les différents couples aux sommets représentant les lignes de production.

De par les éléments indiqués jusqu'à présent, la seule manière de satisfaire la demande périodique consiste soit à profiter de la mix flexibilité en répartissant le volume des produits finis multiaffectés à plusieurs usines soit à recourir à la flexibilité volume. Cependant, comme illustré sur la Figure 50, ceci peut également être réalisé par un lissage de la production sur plusieurs périodes par la constitution de stocks. Ceci a été représenté par l'introduction d'arcs joignant chaque couple à l'autre couple associé au même produit fini mais pour la période précédente. Notons que le sens de ces arcs, de capacité maximale infinie et de coût équivalent à celui de détention du stock, est contre intuitif. En effet, ces arcs ne représentent pas le transfert d'un produit fini d'une période à l'autre mais celui d'une quantité à produire. Autrement dit, sur ceux-ci, le flot représente la part d'une demande exprimée lors d'une période t produite en $t-1$.

L'objectif d'un graphe flot maximal à coût minimum étant de trouver la configuration permettant de faire circuler à coût minimum la quantité de flot la plus importante entre deux nœuds fictifs, un autre sommet nommé « puits » été introduit. A celui-ci ont été reliés les nœuds « capacité » et « flexibilité volume » par l'intermédiaire d'arcs de capacité maximal infinie et de coût nul. Ainsi, compte tenu de la manière avec laquelle a été construit le graphe, la résolution de ce problème de flot permet de déterminer la configuration (ou l'une des configurations) permettant de maximiser la satisfaction de la demande à coût minimum. Notons que de par cette modélisation, aucune notion de profit n'est introduite puisque l'objectif premier est de maximiser la satisfaction de la demande. Cependant, ceci est tout à fait recevable dans un contexte tactique où il est préférable d'engager toute la capacité disponible plutôt que d'arbitrer entre satisfaction de la demande et coûts de production. Remarquons tout de même que ceci n'est pas forcément

valable pour la flexibilité volume. En effet, celle-ci pouvant correspondre au recours à de la main d'œuvre intérimaire, peut présenter des coûts fixes devant être amorti sur un volume de production minimum afin de justifier son utilisation. Dans ce cas, doit être affecté une capacité minimale aux arcs représentant le recours à cette dernière ; ceci permettant d'introduire une notion de rentabilité.

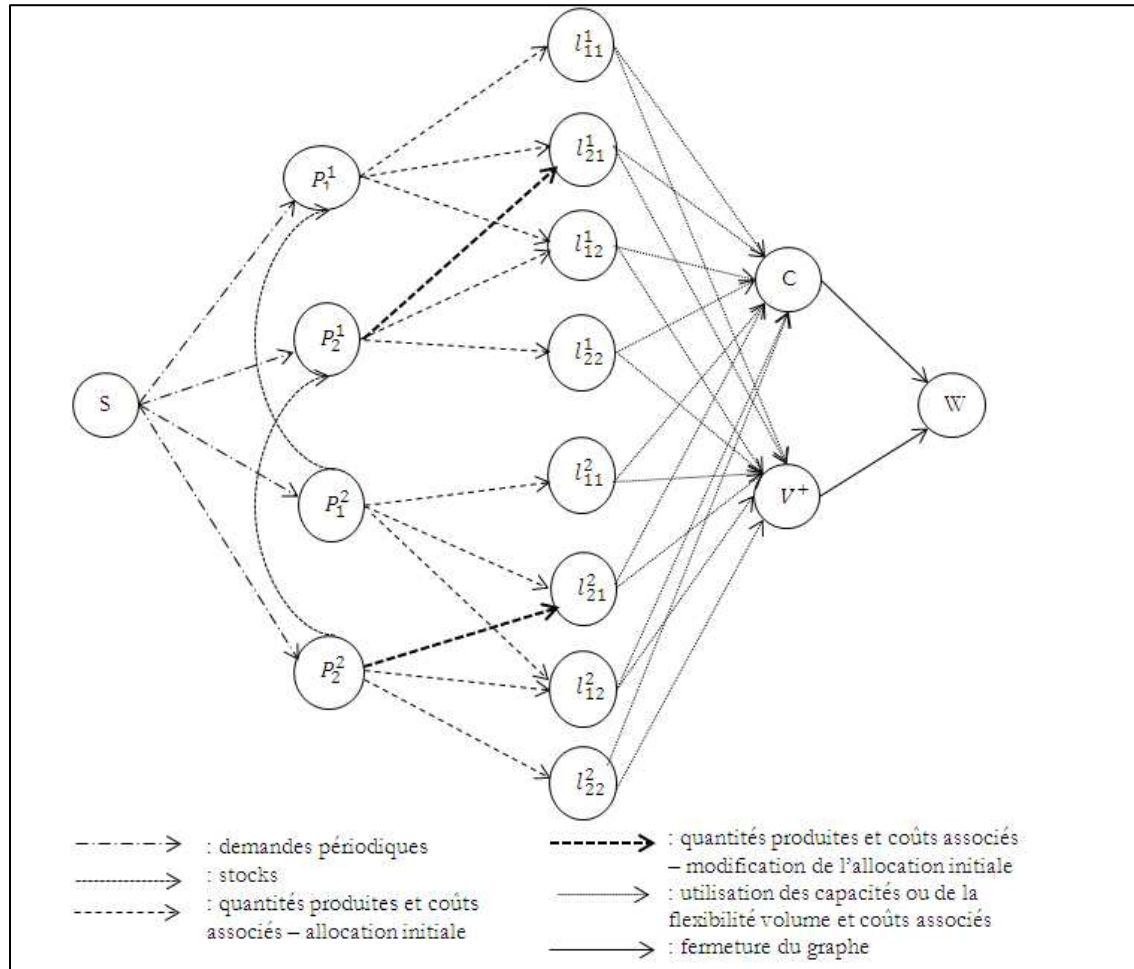


Figure 58 : Graphe flot maximal à coût minimal pour la planification tactique

Avant de s'intéresser à la Figure 58 donnant une illustration du graphe ainsi construit, il convient de revenir sur les arcs reliant les couples aux sommets représentant des lignes de production. En effet, comme indiqué en (ii), certains modélisent une potentielle modification de l'affectation de la production préalablement réalisée. Si l'on ne souhaite pas voir apparaître de tels changements, ceux-ci doivent être supprimés. Dans le cas contraire, si ces derniers sont utilisés dans la solution obtenue, il convient de se poser la question de l'opportunité de modifier l'affectation des produits finis aux usines préalablement établie ; ceci supposant soit de revoir simplement la désagrégation stratégique-tactique réalisée, soit de remettre en cause celle définie initialement à la maille agrégat produit durant la seconde étape de l'environnement intégré de planification. Ainsi, l'introduction de ces arcs facilite la mise en œuvre de la boucle de faisabilité permettant de valider ou d'infirmer les décisions prises au niveau stratégique. Notons que ces explications ne valent que dans le cas de systèmes de production pour lesquels la modification d'une affectation de la production constitue une décision relativement couteuse. En effet, dans le cas contraire, il ne convient pas d'affecter de surcoûts ni même une capacité minimale aux arcs représentant un changement d'affectation, ces derniers pouvant être réalisés périodiquement sans engendrer d'investissements spécifiques.

Sur la Figure 58 peut être consultée une illustration du graphe ainsi construit dans le cas d'un système de production constitué de quatre lignes de production l_{lu}^t et fabriquant deux produits finis P_p^t ($t \in \{1; 2\}$, $l \in \{1; 2\}$, $u \in \{1; 2\}$, $p \in \{1; 2\}$) où t représente le numéro de la période, p celui du produit et l celui de la ligne de production au sein de l'usine u . Notons également, que sur ce graphe, S , W , C et V^+ se réfèrent respectivement à la source, au puits ainsi qu'aux sommets « capacité » et « flexibilité volume ». Ainsi, comme indiqué par la légende associée aux différents arcs, au sein de ce système de production le premier produit est initialement affecté aux deux usines où il peut y être fabriqué sur toutes les lignes de production exception faite de l_{22} . A l'inverse, le produit 2 n'est affecté qu'à la deuxième usine alors même qu'il peut être fabriqué au sein de la seconde ligne de production de la première ; une telle opération se traduisant par une modification de l'affectation initiale.

La modélisation proposée, relativement proche de celle introduite dans la partie, 3.2.2.3, est également résolue à l'aide d'un modèle linéaire similaire à celui donné en annexe pour la résolution du problème d'évaluation stratégique de la flexibilité d'un système de production. Ainsi, ce MILP est constitué lui aussi de deux étapes, la première consistant à déterminer la valeur du flot maximum pouvant circuler dans le graphe et la seconde à définir la configuration permettant de satisfaire cette valeur à coût minimum. Notons que de par les propriétés offertes par la théorie des graphes, notre modélisation permet, comme la précédente, d'adresser des problèmes de grande taille.

4.3. Conclusion sur l'étape de planification tactique

L'étape de planification tactique consiste, comme illustré au sein de cette partie, à réaliser la majeure partie du Programme Directeur de Production (PDP). Plus précisément, il s'agit de déterminer les quantités de chaque produit fini à fabriquer sur chaque ligne de production lors de chaque période et, ceci, en tenant compte des affectations déterminées au niveau stratégique ainsi que du déploiement capacitaire réalisé (constituant le PIC). Notons, qu'au-delà de la planification de la production moyen terme, cette phase intègre également la notion de boucle de faisabilité tactique-stratégique. En effet, la modélisation sous la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal adoptée permet de mettre en évidence l'opportunité de modifier une affectation préalablement établie lors de la planification stratégique. Ceci peut, par exemple, être provoqué par une évolution non attendu du marché d'une manière globale ou pour un segment de produits en particulier.

Au-delà des différents éléments indiqués ci-dessus, il convient également de remarquer que jusqu'à maintenant, aucune notion d'incertitude n'a été mentionnée. En effet, l'objectif de cette étape tactique n'est pas de procéder à un quelconque dimensionnement mais de cadrer et préparer la planification opérationnelle en déterminant les quantités prévisionnelles de chaque produit fini à fabriquer sur chaque ligne de production. Par préparation de la planification opérationnelle, nous entendons la démarche MRP (dictionnaire APICS 2004), consistant à partir des plans de production de produits finis à déterminer les quantités de matières premières ainsi que semi-finis nécessaires. A travers ces différents éléments, nous voyons donc qu'il n'est pas opportun d'introduire ici une quelconque notion d'incertitude sur le niveau réel de la demande.

5. Processus de planification opérationnel

5.1. Hypothèses et simplification

Une fois défini au niveau tactique, en fonction d'équilibres charges-capacités considérés à la maille ligne de production, le PDP doit être validé au niveau opérationnel par la prise en compte de contraintes propres à chacune des machines constituant les usines ; ceci faisant l'objet de la quatrième et dernière étape de notre environnement intégré de planification décrite dans cette partie.

Afin de mener à bien ce processus d'évaluation du PDP, une désagrégation des différentes décisions prises au niveau tactique doit être réalisée. Dans notre cas, ceci consiste concrètement à décliner les quantités à produire mensuelles à la maille hebdomadaire puis à les traduire en un plan de production non plus exprimé pour des triplets (produits finis, ligne de production, mois) mais à la maille (produits finis, machine, jour). En effet, ceci présente l'avantage de permettre une prise en compte des contraintes propres à chaque moyen de fabrication ainsi que de considérer les restrictions relatives à la circulation des flux. Afin de mieux appréhender cette notion, considérons le schéma de la Figure 59. Celui-ci correspond au cas d'une ligne de production constituée de trois étapes de fabrication E_1 , E_2 et E_3 , à chacune desquelles sont associées respectivement deux, trois et cinq machines. Comme nous pouvons le constater, tous les moyens de fabrication d'une étape ne peuvent envoyer leur production vers l'ensemble des machines de l'étape suivante. Par exemple, la première machine de la première étape ne peut faire transiter des encours de fabrication à destination de la troisième de la seconde étape. Ceci impose donc des restrictions capacitaires qui ne peuvent être considérées par un raisonnement à la maille ligne de production ; ce système étant alors modélisé comme une seule et même « machine virtuelle » dotée d'une capacité propre.

Ainsi, dans le cadre de la réalisation de cette dernière étape de notre environnement intégré de planification, a été défini un modèle linéaire spécifique. Celui-ci, introduit au sein de la partie suivante, a pour objectif d'établir un plan de production quotidien pour les différentes machines constituant la ligne de production considérée. Pour ce faire sont bien entendu considérées les affectations de production prises au niveau tactique (i.e. lors de la seconde étape) ainsi qu'une demande hebdomadaire. Cette dernière correspond à l'éclatement des quantités à produire mensuelles décidées au niveau tactique en tenant compte des capacités estimées des machines, du niveau des stocks dans le réseau de distribution et, bien entendu, de la demande court terme exprimée. Notons qu'alors même que cette nouvelle quantité à produire est exprimée à la maille hebdomadaire ; les plans de production sont quant à eux établis pour chaque jour de la semaine considérée. Ceci implique une hypothèse particulière à savoir le fait que le processus de remonté du besoin aux usines est réalisé au plus une fois par semaine. De plus, nous supposons également que le besoin hebdomadaire est exprimé de manière à saturer les différentes lignes de production et reporte les quantités non produites d'une semaine sur l'autre. Autrement dit, notre modèle réalise un plan de production pour chaque semaine individuellement sans introduire de notions de stocks ; ces aspects étant gérés de manière externe.

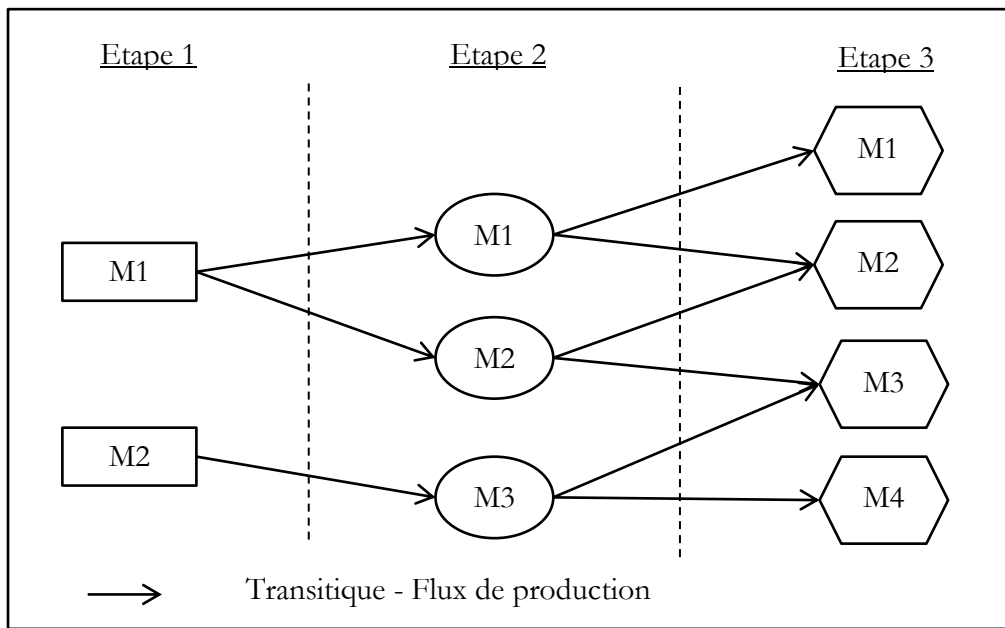


Figure 59 : Exemple de composition d'une ligne de production

Comme indiqué précédemment, au cours de la réalisation du PDP lors de la phase tactique de notre environnement intégré de planification, la notion de pertes de capacités a été introduite par une diminution, à priori, des capacités de chacune des lignes de production en fonction du nombre estimé de famille de standardisation différentes fabriquées. Si cette approche se justifie à un horizon tactique, elle n'est naturellement pas adaptée dans un contexte très court terme où sont considérées des contraintes plus fines. Ainsi, dans le cadre de la troisième étape de notre environnement intégré de planification, les différents produits finis ont été, comme pour le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain, regroupés en différentes familles de standardisation. Pour mémoire ces dernières correspondent à un ensemble de produits partageant les mêmes processus de fabrication et étant réalisés à partir de composants communs, c'est-à-dire à des produits pouvant être fabriqués simultanément sur une même machine sans nécessiter de réglages spécifiques. Naturellement, à l'opposé, la production simultanée d'éléments appartenant à différentes familles de standardisation engendre des pertes de capacités suite à l'immobilisation des machines pour la réalisation de réglages nécessaires.

Ainsi, d'une manière similaire au processus développé dans le modèle linéaire (92)-(133), les capacités quotidiennes des différentes machines ont été diminuées proportionnellement au nombre de familles de standardisation fabriquées. Notons que, ceci, suppose que lors d'une même journée les produits appartenant à une même famille de standardisation soient fabriqués les uns après les autres et non d'une manière morcelée ce qui correspond, dans bien des cas, à la programmation hebdomadaire de la production effectivement réalisée en usine.

Ces précisions faites, il convient désormais de présenter le modèle linéaire réalisé ; celui-ci prenant la forme d'un programme linéaire en nombre entier (MILP).

5.2. Modèle linéaire pour l'établissement d'un plan de production court terme

Comme indiqué dans la partie précédente, le modèle développé a pour objectif, partant des décisions prises lors de l'étape tactique de notre environnement intégré de planification et plus précisément du PDP, de définir un plan de charge des différentes machines constituant une même ligne de productions. Ceci a notamment pour objectif de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité apparaissant de par la prise en compte de contraintes plus fines.

Avant de présenter le MILP réalisé d'une manière détaillée, il convient de préciser la démarche de modélisation utilisée. Celle-ci se base, en partie, sur une approche de type « flot ». Plus précisément, chaque machine de chaque étape de fabrication a été considérée comme un sommet ; ces derniers étant reliés les uns aux autres en fonction des flux de produits possibles au sein de la ligne de production considérée. Partant de cette modélisation, a été imposée une contrainte classique de théorie des graphes, à savoir le fait que la quantité de flot relatif à un produit arrivant à un nœud soit égale à celle en sortant. De plus, a été imposé que la somme des flots arrivant à un nœud soit inférieure ou égale à la capacité de la machine associée ; déduction faite des pertes relatives à la notion de standardisation. De par cette construction, l'objectif correspondant à la maximisation de la production des machines de la première étape, permet d'établir un plan de charge des différents moyens de fabrication de la ligne de production considérée.

Cette approche de modélisation précisée, il est désormais possible de présenter le MILP ainsi construit. Cependant, auparavant, précisons que le modèle présenté ci-dessous, correspondant au cas spécifique d'un processus de fabrication suivant trois étapes successives de production, peut facilement être modifié afin d'être utilisé dans des cas requérant un nombre total d'étapes différents. Afin de faciliter la présentation du MILP ainsi construit, il convient d'introduire maintenant les différentes notations utilisées.

Ensemble :

- T : ensemble des jours de la semaine considérée ;
- S_E1 : ensemble des machines de la première étape ;
- S_E2 : ensemble des machines de la seconde étape ;
- S_E3 : ensemble des machines de la troisième étape ;
- Pdt : ensemble des produits finis ;
- $Famille$: ensemble des familles ;
- $ArcE1_E2$: ensemble des arcs de type (i,j) , $i \in S_E1$, $j \in S_E2$;
- $ArcE2_E3$: ensemble des arcs de type (j,k) , $j \in S_E2$, $k \in S_E3$.

Paramètres :

- $capaMaxE1_{i,t}$: capacités maximales de la machine i ($i \in S_E1$) de l'étape 1 lors de la journée t ($t \in T$) ;
- $capaMaxE2_{j,t}$: capacités maximales de la machine j ($j \in S_E2$) de l'étape 2 lors de la période t ($t \in T$) ;
- $capaMaxE3_{k,t}$: capacités maximales de la machine k ($k \in S_E3$) de l'étape 3 lors de la période t ($t \in T$) ;
- d_p : demande du produit p ($p \in P$) pour la semaine considérée ;

- $capabiliteE1_p$: paramètre valant 1 si la machine i , ($i \in S_E1$) de l'étape 1 a la capacité technique de fabriquer le produit p ($p \in P$) et 0 sinon ;
 $capabiliteE2_{p,j}$: paramètre valant 1 si la machine j ($j \in S_E2$) de l'étape 2 a la capacité technique de fabriquer le produit p ($p \in P$) et 0 sinon ;
 $capabiliteE3_{p,k}$: paramètre valant 1 si la machine k ($k \in S_E3$) de l'étape 3 a la capacité technique de fabriquer le produit p ($p \in P$) et 0 sinon ;
 $pCapaE1$: perte de capacités associée à la production de deux familles de standardisation différentes sur une même machine lors d'une même période sur une machine de l'étape 1;
 $pCapaE2$: perte de capacités associée à la production de deux familles de standardisation différentes sur une même machine lors d'une même période sur une machine de l'étape 2;
 $pCapaE3$: perte de capacités associée à la production de deux familles de standardisation différentes sur une même machine lors d'une même période sur une machine de l'étape 3 ;
 $iPrE1_p, p \in P$: nombre d'unité de capacités nécessaire à la production du produit p lors de la première étape ;
 $iPrE2_p, p \in P$: nombre d'unité de capacités nécessaire à la production du produit p lors de la seconde étape ;
 $iPrE3_p, p \in P$: nombre d'unité de capacités nécessaire à la production du produit p lors de la troisième étape ;
 M : très grand entier.

Variables :

- $production_{p,i,t}$: quantités de produits de type p ($p \in P$) fabriqués sur la machine i ($i \in S_E1$) de la première étape lors de la période t ($t \in T$) ;
 $flotE1_E2_{p,i,j,t}$: flux de produit de type p ($p \in P$) circulant de la machine i de la première étape à la machine j ($(i,j) \in ArcE1_E2$) de la seconde étape lors de la période t ($t \in T$) ;
 $flotE2_E3_{p,j,k,t}$: flux de produit de type p ($p \in P$) circulant de la machine j de la seconde étape à la machine k ($(j,k) \in ArcE2_E3$) de la troisième étape lors de la période t ($t \in T$) ;
 $estPdtE1_{f,i,t}$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille f ($f \in Famille$) est fabriqué sur la machine i ($i \in S_E1$) de la première étape lors de la journée t ($t \in T$) ;
 $estPdtE2_{f,j,t}$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille f ($f \in Famille$) est fabriqué sur la machine j ($j \in S_E2$) de la seconde étape lors de la journée t ($t \in T$) ;
 $estPdtE3_{f,k,t}$: variable binaire valant 1 si au moins un élément de la famille f ($f \in Famille$) est fabriqué sur la machine k ($k \in S_E3$) de la troisième étape lors de la journée t ($t \in T$) ;

- $pCapaVarE1_{i,p}$: pertes de capacités issues de la production de différentes famille de standardisation sur la machine i ($i \in S_E1$) de la première étape lors de la journée t ($t \in T$) ;
- $pCapaVarE2_{j,t}$: pertes de capacités issues de la production de différentes famille de standardisation sur la machine j ($j \in S_E2$) de la seconde étape lors de la journée t ($t \in T$) ;
- $pCapaVarE3_{k,p}$: pertes de capacités issues de la production de différentes famille de standardisation sur la machine k ($k \in S_E3$) de la troisième étape lors de la journée t ($t \in T$).

Ces notations définies, il convient maintenant d'introduire le modèle linéaire réalisé.

$$\text{Max : } \sum_{i \in S_E1} \sum_P \sum_T \text{production}_{p,i,t} \quad (137)$$

s.t.

$$\sum_T \sum_{i \in S_E1} \text{production}_{p,i,t} \leq d_p, \forall p \in P \quad (138)$$

$$\text{production}_{p,i,t} = \sum_{(i,j) \in \text{Arc}E1_E2} \text{flot}E1_E2_{p,i,j,t}, \forall p \in P, \forall i \in S_E1, \forall t \in T \quad (139)$$

$$\sum_{(i,j) \in \text{Arc}E1_E2} \text{flot}E1_E2_{p,i,j,t} = \sum_{(j,k) \in \text{Arc}E2_E3} \text{flot}E2_E3_{p,j,k,t}, \forall p \in P, \forall j \in S_E2, \forall t \in T \quad (140)$$

$$\sum_P \text{production}_{p,i,t} \times tPrE1_p \leq \text{capaMax}E1_{i,t} - pCapaVarE1_{i,t} \times pCapaE1, \forall i \in S_E1, \forall t \in T \quad (141)$$

$$\sum_{(i,j) \in \text{Arc}E1_E2} \sum_P \text{flot}E1_E2_{p,i,j,t} \times tPrE2_p \leq \text{capaMax}E2_{j,t} - pCapaVarE2_{j,t} \times pCapaE2, \forall j \in S_E2, \forall t \in T \quad (142)$$

$$\sum_{(j,k) \in \text{Arc}E2_E3} \sum_P \text{flot}E2_E3_{p,j,k,t} \times tPrE3_p \leq \text{capaMax}E3_{k,t} - pCapaVarE3_{k,t} \times pCapaE3, \forall k \in S_E3, \forall t \in T \quad (143)$$

$$\sum_{p \in f} \text{production}_{p,i,t} \leq M \times \text{estPdt}E1_{f,i,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall i \in S_E1, \forall t \in T \quad (144)$$

$$\sum_{(i,j) \in \text{Arc}E1_E2} \sum_{p \in f} \text{flot}E1_E2_{p,i,j,t} \leq M \times \text{estPdt}E2_{f,i,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall j \in S_E2, \forall t \in T \quad (145)$$

$$\sum_{(j,k) \in \text{Arc}E2_E3} \sum_{p \in f} \text{flot}E2_E3_{p,j,k,t} \leq M \times \text{estPdt}E3_{f,i,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall j \in S_E3, \forall t \in T \quad (146)$$

$$\sum_{f \in \text{Famille}} \text{estPdt}E1_{f,i,t} \leq 1 + pCapaVarE1_{i,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall i \in S_E1, \forall t \in T \quad (147)$$

$$\sum_{f \in \text{Famille}} \text{estPdt}E2_{f,j,t} \leq 1 + pCapaVarE2_{j,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall j \in S_E2, \forall t \in T \quad (148)$$

$$\sum_{f \in \text{Famille}} \text{estPdt}E3_{f,k,t} \leq 1 + pCapaVarE3_{k,t}, \forall f \in \text{Famille}, \forall k \in S_E3, \forall t \in T \quad (149)$$

$$\sum_T \text{production}_{p,i,t} \leq M \times \text{capabilite}E1_{p,i}, \forall p \in P, \forall i \in S_E1 \quad (150)$$

$$\sum_{(i,j) \in \text{Arc}E1_E2} \sum_T \text{flot}E1_E2_{p,i,j,t} \leq M \times \text{capabilite}E2_{p,j}, \forall p \in P, \forall j \in S_E2 \quad (151)$$

$$\sum_{(j,k) \in \text{ArcE2_E3}} \sum_T \text{flotE2_E3}_{p,j,k,t} \leq M \times \text{capabiliteE3}_{p,k}, \forall p \in P, \forall k \in S_E3 \quad (152)$$

$$(\text{production}_{p,i,t}, \text{flotE1}_{E2p,i,j,t}, \text{flotE2}_{E3p,j,k,t}, p\text{CapaVarE1}_{i,t}, p\text{CapaVarE2}_{j,t}, \\ p\text{CapaVarE3}_{k,t}) \in N^6, \forall f \in \text{Famille}, \forall i \in S_{E1}, \forall j \in S_{E2}, \forall k \in S_{E3}, \forall t \in T, \forall (i,j) \\ \in \text{ArcE1_E2}, \forall (j,k) \in \text{ArcE2_E3} \quad (153)$$

$$(\text{estPdtE1}_{f,i,t}, \text{estPdtE2}_{f,j,t}, \text{estPdtE3}_{f,k,t}) \in \{0; 1\}^3, \forall f \in \text{Famille}, \forall i \in S_{E1}, \forall j \in S_{E2}, \forall k \in S_{E3} \quad (154)$$

Comme indiqué précédemment, l'objectif de ce modèle est d'obtenir un plan de production permettant de satisfaire la plus grande part possible de la demande hebdomadaire. Cet aspect est introduit par l'intermédiaire de la fonction objectif (137), maximisant la somme des quantités produites sur l'ensemble des périodes, et l'équation (138) imposant que ces dernières ne dépassent pas la demande hebdomadaire associée à chaque produit individuellement. Une fois les quantités à produire sur chacune des machines de la première étape lors des différentes périodes définies, celles-ci doivent être réparties sur les autres moyens de fabrication. Ceci est le propre des inégalités (139) et (140) constituant des contraintes d'égalité des flots. Ainsi, la première impose que pour chaque produit, le flux partant de chaque machine de la première étape à destination de celles de la seconde étape soit égal aux quantités produites. La seconde, quant à elle, représente également une contrainte d'égalité des flots pour les machines de la seconde étape. Ainsi, elle impose, pour chacune de ces dernières, que le flux relatif à chaque produit y arrivant soit égal à la somme de ceux partant vers d'autres machines de la troisième étape.

A ce stade, il convient de rappeler que la somme des flots, relativement à un produit, arrivant à une machine de la seconde ou de la troisième étape, correspond à la quantité produite sur cette dernière. Bien entendu, ces décisions de production doivent être prises en considérant les limitations relatives aux capacités ainsi qu'aux pertes de capacités associées ; ceci étant réalisé par l'intermédiaire des équations (141)-(143). Ces dernières imposent que la somme des quantités produites par chacune des machines des différentes étapes soit inférieure ou égale à leur capacité diminuée des pertes éventuelles. Notons que les temps de production, exprimés en unité de capacité, diffèrent selon les produits mais également selon les machines considérées et, ceci, par l'intermédiaire des paramètres $tPrE1_p$, $tPrE2_p$ et $tPrE3_p$ ($p \in P$). De plus, remarquons que conformément aux éléments indiqués précédemment, dans le cas des machines de la première étape, ces contraintes de capacités font intervenir les variables de production ($\text{production}_{p,i,t}$, $p \in P, i \in S_E1, t \in T$) tandis que pour les autres étapes, sont considérées les variables de flots ($\text{flotE1_E2}_{p,i,j,t}$ et $\text{flotE2_E3}_{p,j,k,t}$, $p \in P, (i,j) \in \text{ArcE1_E2}, (j,k) \in \text{ArcE2_E3}, t \in T$). Au-delà de ces paramètres, ces contraintes nécessitent l'introduction d'autres inégalités dans le but d'évaluer le calcul des pertes de capacités. Ainsi, par l'intermédiaire des inéquations (144)-(146), est affectée, la valeur 1 aux variables de type $\text{estPdtE1}_{f,i,t}$ (respectivement $\text{estPdtE2}_{f,j,t}$ et $\text{estPdtE3}_{f,k,t}$) ($f \in \text{Famille}, i \in S_E1, j \in S_E2, k \in S_E3, t \in T$) lorsqu'au moins un produit de la famille f considérée est fabriqué sur une machine i donnée (respectivement j, k) lors de la période t en question. Ces variables sont ensuite utilisées au sein des contraintes (147)-(149) afin d'estimer le nombre de familles de standardisation fabriquées sur chaque machine lors de chaque période. Plus précisément, à $p\text{CapaVarE1}_{i,t}$ (respectivement $p\text{CapaVarE2}_{j,t}$ et $p\text{CapaVarE3}_{k,t}$) est affectée une valeur supérieure ou égale au nombre de familles de standardisation fabriquées sur la machine considérée lors de la période considérée, diminuée de 1. Ceci permet de ne pas restreindre les capacités au sein des contraintes (141)-(143) lorsque seulement une famille est produite, aucun réglage de machine ne devant être réalisé dans ce cas. Notons que le fait de ne pas borner les variables $p\text{CapaVarE1}_{i,t}$, $p\text{CapaVarE2}_{j,t}$ et $p\text{CapaVarE3}_{k,t}$ ($i \in S_E1, j \in S_E2, k \in$

$S_{E3}, t \in T$) ne constitue pas une erreur en soit. En effet, l'objectif étant de produire la totalité de la demande hebdomadaire, celles-ci se verront affecter la valeur la plus petite possible afin de profiter pleinement des capacités disponibles.

En plus de ces différentes inégalités, d'autres contraintes restreignent la production des produits sur les différentes machines. Celles-ci, correspondantes aux inéquations (150)- (152), interdisent la fabrication d'un produit sur une machine n'ayant pas les caractéristiques techniques suffisantes. Notons que, malgré la supposée homogénéité des moyens de fabrication associés au sein d'une même ligne de production, un tel phénomène peut cependant se produire ponctuellement pour certains produits ayant des contraintes spécifiques très précises. En ce qui concerne les contraintes (153)et (154) ; celles-ci assurent respectivement l'intégrité ainsi que la binarité des variables.

Une des particularités du modèle ainsi construit et présenté au cours de ce chapitre est son approche « multiflots ». Cette caractéristique lui permet, entre autre, d'offrir des temps de résolution relativement courts et, ce, même dans le cas d'instances de grandes tailles. Cependant, avant de s'intéresser à cette particularité au sein de la partie 5.4, il convient de présenter une illustration du fonctionnement du modèle.

5.3. Application du modèle de planification opérationnelle

Cette partie ayant uniquement pour objet d'illustrer le fonctionnement du modèle, y est considéré un exemple volontairement simple. Celui-ci, représenté par l'intermédiaire de la Figure 60, correspond au cas d'une ligne de production constituée de deux machines au niveau de l'étape 1, de trois au niveau de l'étape 2 et de cinq au niveau de l'étape 3. De plus, des contraintes de transitiques sont imposées. Ainsi, comme illustré sur cette même figure, aucun flux de produits ne peut transiter entre la machine M_1 de la première étape et la machine M_3 de la seconde étape.

Partant de cette configuration, provenant de ces différentes machines pour lesquelles les capacités hebdomadaires sont également indiquées au sein de cette même figure, le test a consisté à planifier sur 7 jours la production de 20 produits finis ayant chacun une demande de 1000 pour la semaine considérée. Pour cette application numérique, une solution optimale a pu être obtenue en moins d'une seconde à l'aide du solveur Cplex. Alors même que la capacité de l'étape goulot (étape 3) est de 19600, seuls 18200 produits ont été fabriqués. Ceci provient des contraintes de flux imposées. En effet, comme illustré sur la Figure 61 indiquant la valeur des différents flux entre les machines, la machine de la première étape ne peut être saturée faute de capacités disponibles au niveau des machines de la troisième étape avec lesquelles elle peut établir un flux de production (machines M_1 , M_2 et M_3 de la troisième étape pour lesquelles les capacités sont totalement utilisées). A l'inverse, les machines M_4 et M_5 ne peuvent quant à elles être saturées par manque de capacité au niveau de la machine M_2 de la première étape, unique machine avec laquelle peut être établi un flux de production.

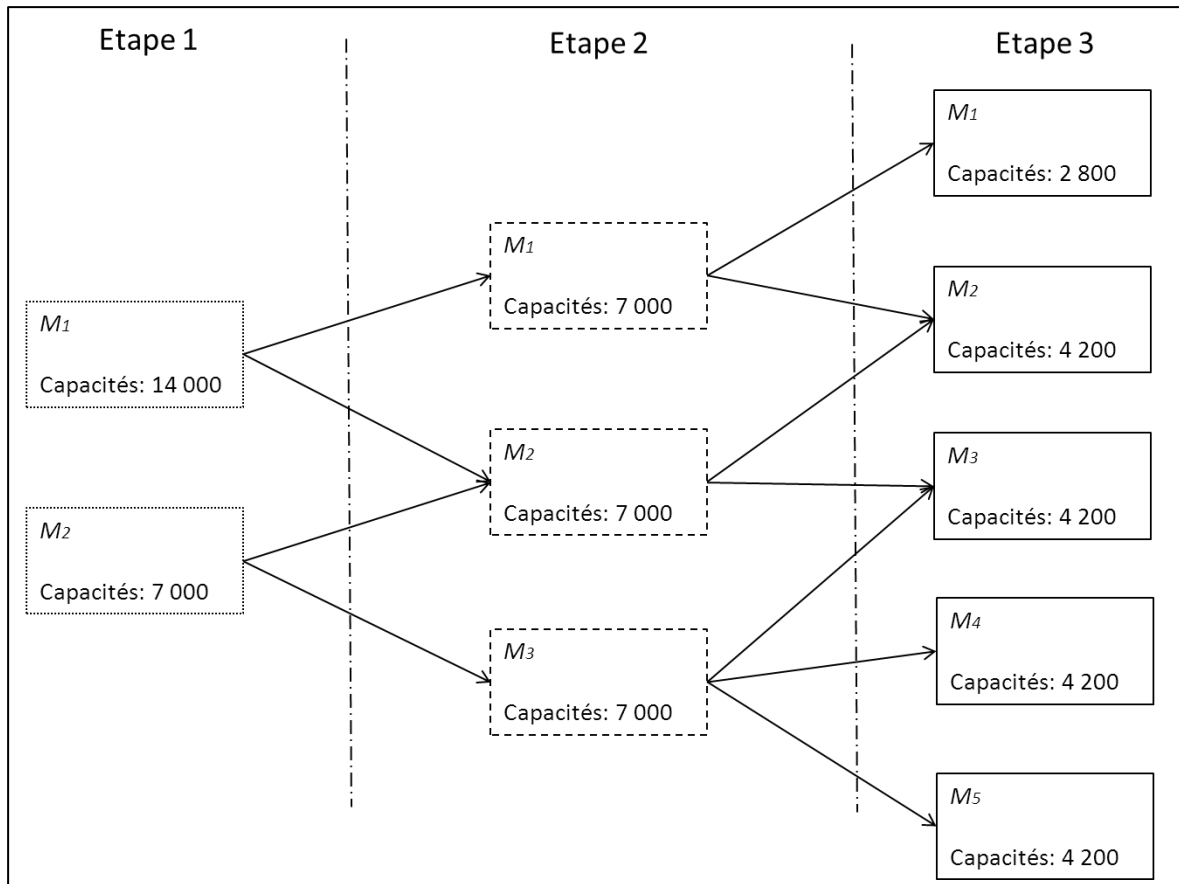


Figure 60 : Instance associée au premier test du modèle de planification opérationnelle

Au-delà de son fonctionnement, ce test illustre bien la capacité de notre modèle à tenir compte de paramètres opérationnels, tels que les contraintes de flux, ne pouvant être considérés au niveau tactique. A ce titre, il constitue donc bien une boucle de faisabilité tactique-opérationnel, comme indiqué au sein de la partie précédente.

L'instance présentée au cours de cette partie a été résolue en moins d'une seconde à l'aide du solveur Cplex. Bien que cette valeur soit relativement faible, il convient avant de tirer des enseignements quant aux temps d'exécution, d'analyser d'avantages de résultats ; ceci faisant l'objet de la partie suivante.

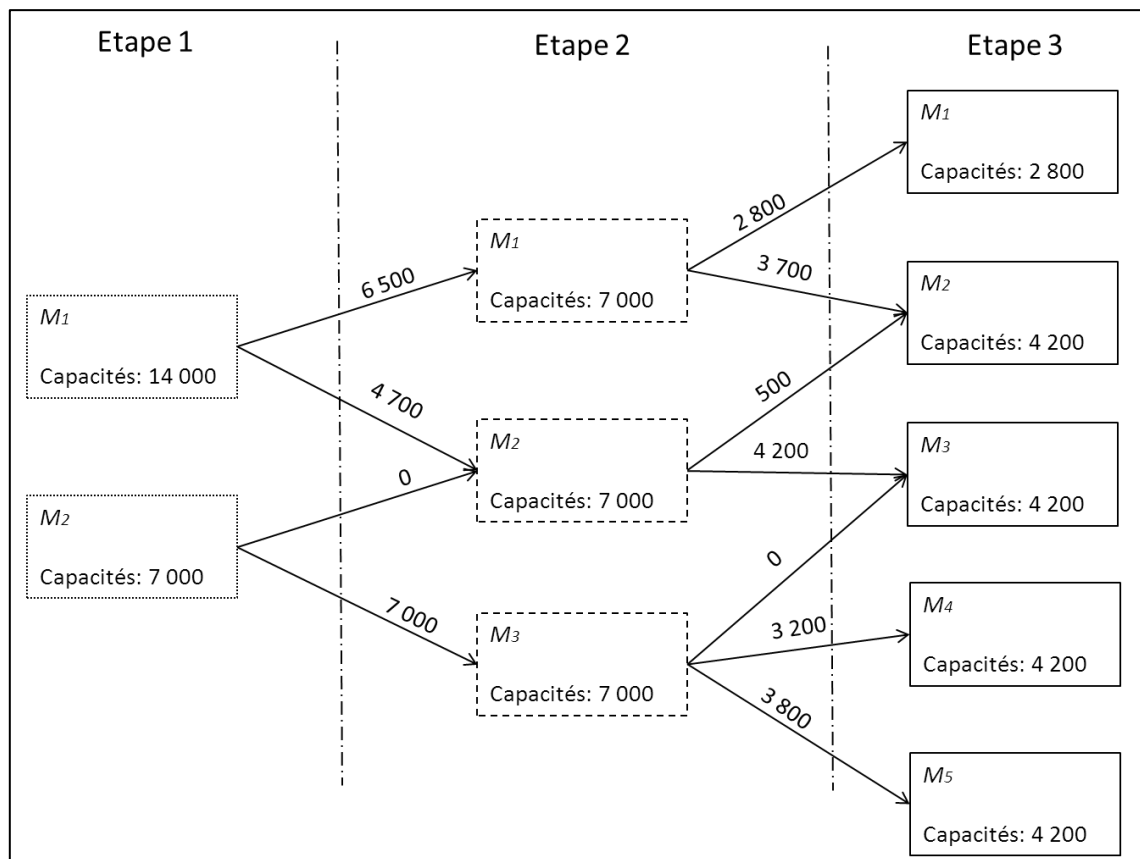


Figure 61 : Résultat associé au premier test du modèle de planification opérationnelle

5.4. Temps de résolution associés à l'étape de planification opérationnelle

L'un des objectifs principaux associé à l'intégralité de nos travaux de recherche est l'obtention de modèles et méthodes capables d'adresser des problèmes de grande taille. Le MILP relatif à la quatrième étape de notre environnement intégré de planification n'échappant pas à cette règle ; celui-ci a fait l'objet de différents tests dans le but d'évaluer sa capacité à résoudre des instances relativement importantes dans des temps adéquats. Ainsi, en plus de celle introduite précédemment, différentes configurations, décrites au sein du Tableau 22, ont été considérées. Celles-ci ont été générées de manière, certes, à évaluer les temps de calcul mais également à identifier l'impact de la complexité de la ligne de production d'une part et du nombre de produits considérés d'autre part. Plus précisément, les trois premiers tests correspondent à une ligne de production composée de deux, trois et cinq machines, pour respectivement la première, la seconde et la troisième étape de fabrication, et devant produire respectivement deux, dix et deux cents produits. Les deux derniers tests portent, quant à eux, sur une ligne de production constituée de cinq machines pour la première étape de fabrication, huit pour la seconde et quatorze pour la dernière dans le cas d'un portefeuille de produits composés de dix et deux cents éléments. De plus, compte tenu de l'objectif du MILP, à savoir la réalisation d'une programmation hebdomadaire de la production, le nombre de périodes considérées a été fixé à sept ; ceci correspondant aux différents jours d'une semaine.

Nombre de produits	Nombre de familles de standardisation	Nombre de machines			Temps de résolution	
		Etape 1	Etape 2	Etape 3	1 ^{ère} solution réalisable (écart borne inférieure en %)	Solution optimale
2	2	2	3	5	0,02s (0%)	0,02s
20	10	2	3	5	0,71s (1,11%)	0,85s
200	50	2	3	5	22,12s (184,17%)	/
20	10	5	8	14	0,52s (28,27%)	1,31s
200	50	5	8	14	26,02s (196,15%)	2005,17s

Tableau 22: Evaluation de la vitesse d'exécution du modèle pour la planification opérationnelle

Ces différentes configurations ont été évaluées à l'aide du solveur Cplex ; leur exécution étant arrêtée au bout de 6h00 de temps de calcul. Le principal enseignement des résultats, indiqués sur ce même Tableau 22, correspond à la capacité du modèle à résoudre des problèmes de tailles conséquentes dans des temps relativement faibles. Ainsi, une solution optimale de l'instance la plus importante, à savoir la dernière, a pu être obtenue en 33 minutes, ce qui correspond à un temps relativement court compte tenu de la taille du problème associé. Un autre fait marquant est la rapidité avec laquelle ont pu être résolues les instances les plus faibles, à savoir moins d'une seconde. Notons, cependant, que dans le cas de la troisième instance seulement une solution réalisable présentant un écart avec la borne inférieure définie par Cplex de 11,90% a pu être obtenue en 6h00 de temps de calcul. Ceci paraît, à première vue, surprenant puisque ce problème semble être, apparemment, moins complexe que le cinquième pour lequel une solution optimale a été obtenue en 33 minutes. Cette différence provient d'une configuration différente en termes de capacités techniques. Plus précisément, le nombre de machine capables de fabriquer chaque produit est plus faible dans le cas de ce troisième problème que dans le dernier ; ceci expliquant la différence des temps d'exécution associés. Notons, afin de refléter plus fidèlement la qualité du MILP développé, que pour cette même troisième instance, une solution réalisable, présentant un écart avec la borne inférieure fournie par Cplex de 12,15%, a été obtenue en 11 minutes et, ce, alors même que la solution obtenue au bout de 6h00 se situe à 11,90% de cette même borne. De plus, rappelons qu'en réalité, de par le processus de modélisation d'une ligne de production, les machines les constituants sont, en générale, homogènes techniquement, c'est-à-dire capables de fabriquer exactement les mêmes produits. Par conséquent, la notion de capacité technique n'intervient que très peu, ce qui limite la portée de cette troisième instance.

Conformément aux éléments indiqués lors de la partie précédente, la résolution de ces différents tests a permis l'obtention d'un plan de charge quotidien ; les quantités à produire sur les machines de la première étape étant portées par les variables $production_{p,i,t}$ ($p \in P, i \in S_E1, t \in T$) et pour les autres par celles de flots ($flotE1_E2_{p,i,j,t}$ et $flotE2_E3_{p,j,k,t}$ $p \in P, (i,j) \in ArcE1_E2, (j,k) \in ArcE2_E3, t \in T$). De par de tels résultats, le MILP développé permet donc d'identifier d'éventuels déséquilibres charges-capacités et par conséquent, le cas échéant, de remettre en cause les décisions prises lors de la réalisation du PDP. A ce titre, il constitue une boucle de faisabilité tactique-opérationnel, ce dernier point étant abordé plus précisément au sein de la partie suivante.

5.5. Conclusion sur le processus de planification opérationnel

A travers sa description réalisée dans la partie précédente, nous pouvons noter que le modèle linéaire, constituant la quatrième étape de cet environnement de planification, correspond d'avantage à une boucle de faisabilité tactique – opérationnelle qu'à un réel plan de production court terme. En effet, il consiste uniquement à décliner les décisions tactiques de la maille ligne de production à la maille machine puis à établir un plan de charge de ces dernières afin, notamment, de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité nécessitant la remise en cause du PDP.

Ce constat définit une perspective d'évolution immédiate de notre environnement intégré de planification à la savoir la réalisation, au sein de cette quatrième étape, d'un véritable processus MRP permettant de définir les quantités de chaque semi-finis à fabriquer à partir du PDP. A ceci s'ajoute la nécessité d'introduire un modèle d'ordonnancement permettant la réalisation d'un réel plan de production très court terme. Ceci permettrait, en effet, d'obtenir un environnement intégré de planification couvrant l'intégralité des décisions relatives à la production mentionnées au sein de la Figure 4.

6. Temps de résolution et taille des problèmes considérés

Au cours des parties précédentes, pour chacune des modélisations proposées, a été évoquée la notion de temps de résolution notamment à travers l'évocation d'études pratiques liées à leur utilisation, certaines pouvant être retrouvées dans les différents articles référencés. Cependant, afin de permettre au lecteur de se faire une meilleure idée de l'applicabilité de nos solutions et, plus globalement, du processus intégré de planification, il convient d'apporter des précisions à ce sujet. Ainsi, comme indiqué précédemment, dans le cas de la phase stratégique le modèle de flot permet d'obtenir des solutions optimales pour des instances de relativement grandes tailles en des temps très court. Par exemple, la résolution à l'aide du solveur Cplex d'un problème composé de 600 agrégats produits et 40 lignes de production a nécessité moins de deux minutes. Ceci garantit ainsi des temps d'exécution relativement faibles quel que soit le nombre d'itérations effectués dans le cadre du processus de simulation de Monte Carlo associé. Concernant le modèle linéaire, adapté au déploiement capacitaire dans le cas d'industries où les affectations de production peuvent être modifiées périodiquement, les temps d'exécutions s'avèrent un peu moins bon. Ainsi, dans le cas d'un système de production composé de 4 lignes de production, 10 agrégats produit et 12 périodes, le temps moyen nécessaire à la résolution de chacune des étapes du processus de simulation de Monte Carlo associé est légèrement inférieur à 120 secondes. Rappelons que pour le GRASP, et comme présenté lors de la partie 3 du chapitre précédent, les temps d'exécution sont faibles et, ce, même pour des instances de grandes tailles.

En ce qui concerne l'étape de planification tactique, la structure de la modélisation étant identique au graphe flot maximal à coût minimal utilisé dans le cadre stratégique, les temps d'exécution sont relativement similaires, c'est-à-dire faibles même dans le cas de problèmes de grandes tailles. Quant au MILP propre à la dernière étape de notre environnement intégré de planification, les temps d'exécution sont relativement faibles. Ainsi, comme illustré par l'intermédiaire du Tableau 22, la résolution d'instances de grandes tailles (plus de 100 produits et 23 machines) nécessite environ 30 minutes de temps de calcul.

A travers ces éléments, nous pouvons noter la capacité de chacune des étapes de l'environnement de planification proposé à résoudre des instances de relativement grandes tailles. Ceci correspond à l'un de nos objectifs à savoir la construction de modèles et méthodes capables d'adresser des cas industriels et complexes. Cependant, préalablement à toute application réelle de

l'environnement de planification proposé, il convient en plus des éléments relatifs à la quatrième étape mentionnés précédemment, d'automatiser le processus de déclinaison des décisions stratégique-tactique ; ceci constituant l'une des perspectives d'évolution mentionnées au sein de la conclusion.

7. Conclusion

Afin de ne pas seulement couvrir l'horizon long terme, au sein de ce chapitre a été proposé un environnement intégré de planification portant également sur les planifications tactique et opérationnelle. Ainsi, différents modèles et méthodes ont été construits afin d'adresser tout ou partie des processus, relatifs à la « fonction production » au sein d'une Supply Chain, décrits sur la Figure 4. De plus, ont été intégrées différentes boucles de faisabilités permettant de valider ou infirmer les décisions prises à un niveau (stratégique par exemple) par leur déclinaison au niveau inférieur (tactique par exemple).

Pour se faire, l'environnement intégré a été divisé en quatre étapes bien distinctes associées aux horizons considérés. En ce qui concerne les deux premières phases consacrées à la planification stratégique, celles-ci consistent d'une part à définir les capacités maximales théoriques à installer et, une fois cette décision prise, d'autre part à déterminer le pourcentage de ces dernières à utiliser d'une manière courante et celui à allouer à la flexibilité volume. Ces dernières décisions pouvant être influencées par l'affectation des agrégats produits aux usines déterminant la mix flexibilité du système ; deux cas spécifiques ont été séparés. Le premier correspond à celui relatif aux industries à faible mobilité de la production c'est-à-dire aux entreprises pour lesquelles les affectations des agrégats produits aux usines se traduisent par des investissements conséquents limitant la fréquence de leurs modifications. A l'inverse, le second correspond aux industries au sein desquelles des changements d'affectation de la production sont réalisés périodiquement sans entraîner de surcoûts important. Ainsi, dans ce dernier cas, l'affectation de la production ne constitue pas une décision stratégique à l'inverse du premier. Afin de tenir compte de ces spécificités, deux processus particuliers ont été développés. Le premier est constitué du GRAPS précédemment introduit et d'un modèle de flot monopériode pour l'évaluation de la flexibilité d'un système de production tandis que le second est composé d'un unique modèle linéaire. Afin de permettre la prise en compte de l'incertitude relative à la demande indispensable à un tel horizon, ces différentes méthodes ont toutes été intégrées au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo. Remarquons également que ces deux étapes stratégiques comprennent une boucle de faisabilité permettant de revoir le dimensionnement capacitaire en fonction des résultats provenant de son déploiement.

D'une manière similaire, une modélisation spécifique a été associée à la troisième étape, de notre environnement intégré de planification, relative à la planification tactique. Celle-ci, prenant la forme d'un graphe flot maximal à coût minimal, a pour objectif de réaliser un Programme Directeur de la Production au regard des éléments décidés au niveau stratégique. Elle consiste ainsi à déterminer les quantités de chaque produit fini à fabriquer sur chaque ligne de production à la maille mois. Au-delà de la réalisation du PDP, et compte tenu de la prise en compte de contraintes plus fines que dans le cadre stratégique, cette troisième étape permet de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité nécessitant la remise en cause des décisions long terme prises lors des deux premières phases de l'environnement intégré de planification. A ce titre elle constitue une boucle de faisabilité stratégique-tactique.

Partant de ces différentes décisions, et notamment du PDP ainsi réalisé au niveau tactique, la dernière étape consiste, quant à elle, à effectuer une planification opérationnelle au sein même de chaque usine. Plus précisément, celle-ci a pour objectif d'établir un plan de charge des

machines de chacune des lignes de production au regard des affectations de production décidées lors de la seconde étape de l'environnement intégré de planification. Ainsi, de par la prise en compte de contraintes plus fines mais également de l'actualisation des prévisions de demande en fonction des nouvelles données du marché, elle constitue une phase d'évaluation de la pertinence des décisions tactique au niveau opérationnel et donc une boucle de faisabilité tactique-opérationnel.

Conformément à l'une des contraintes de nos travaux de recherche, à savoir la capacité à résoudre des instances industrielles dans des temps adéquats, les modèles et méthodes constituant les différentes étapes de l'environnement intégré de planification, présentent tous des temps de résolution relativement faibles et ceci, notamment, dans le cas d'instances de grandes tailles. Ceci est d'ailleurs particulièrement le cas des modèles de flot développés qui de par leurs structures présentent des temps d'exécution de quelques secondes seulement.

Malgré ces faibles temps de résolution et la cohérence des différentes étapes de notre environnement intégré de planification, celui-ci peut être amélioré en plusieurs points. Tout d'abord, il convient de compléter la dernière étape relative à la planification opérationnelle. Plus précisément, il s'agit de développer ou d'introduire des méthodes existantes permettant, d'une part, la mise en œuvre d'une démarche de type MRP et, d'autre part, la réalisation d'un ordonnancement de la production indispensable à la mise en œuvre effective des différentes décisions. De plus, il convient également d'automatiser la déclinaison des décisions d'un niveau sur l'autre ; déclinaison indispensable au fonctionnement des différents modèles et méthodes développées.

Ainsi, ajoutée aux méthodes déjà développées, la réalisation de ces perspectives permettrait d'obtenir un environnement de planification, de la partie production d'une Supply Chain, complet c'est-à-dire couvrant l'ensemble des décisions associées représentées au sein de la Figure 4.

Conclusion générale

Les travaux de recherche faisant l'objet de ce manuscrit de thèse s'inscrivent dans la thématique du Supply Chain Network Design (SCND). Ils ont porté sur un problème théorique issu de l'extension d'une des problématiques de planification stratégique de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin.

Dans ce contexte, au cours de ce doctorat a été abordé plus précisément le problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDRF) du système de production d'une Supply Chain dans un environnement incertain. Celui-ci consiste à déterminer les lieux de production de différents agrégats produits sur un horizon de plusieurs années tout en considérant différents paramètres, à savoir :

- (i) des contraintes de capacités ;
- (ii) des contraintes de capacité technique ;
- (iii) des paramètres liés à la standardisation correspondant à la volonté de regrouper la production des produits, partageant des composants et procédés de fabrication communs, dans le but de réduire la diminution du CRI issu de l'immobilisation des machines suite à la réalisation de réglages nécessaires au lancement de toute nouvelle production ;
- (iv) le dimensionnement des ressources spécifiques à chaque produit ainsi que leurs potentiels transferts entre les différentes usines ;
- (v) la prise en compte d'une solution initiale correspondante à l'impossibilité de modifier totalement la configuration courante d'affectation des productions et, ce, pour des raisons d'argent disponible (free cash-flow) et de désorganisation trop importante de la Supply Chain ;
- (vi) le caractère incertain de la demande.

Notons, qu'au-delà de la nécessité de considérer les potentielles erreurs de prévisions afin de construire une affectation de la production robuste, le point (vi) implique également le dimensionnement d'une partie de la flexibilité du système de production considéré. Cette dernière correspond à la mix flexibilité, c'est-à-dire à l'affectation de la fabrication de produits à plusieurs usines dans le but d'effectuer des transferts de volume à produire entre ces dernières en cas de déséquilibre charge-capacité. Bien qu'offrant de la flexibilité et permettant de pallier des phénomènes de surcharge de certaines usines, cette affectation multiple de la production doit être dimensionnée d'une manière adéquate de par les surcoûts importants engendrés.

A travers une analyse de la littérature existante et, plus particulièrement de celle relative au SCND, est apparue l'impossibilité de résoudre le problème considéré à l'aide de travaux existants. Ceci provient de plusieurs aspects ; le premier correspondant à la nécessité, dans notre cas, de disposer de modèles et méthodes capables de résoudre des problèmes de grande taille. En effet, de par le caractère industriel de nos travaux et de leur application dans le cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin, ceux-ci doivent être à même de résoudre des instances réelles complexes, c'est-à-dire comportant plusieurs dizaines de milliers de variables. De plus, une des particularités du problème ASPDRF considéré, ne permettant pas de le résoudre à l'aide de méthodes et modèles existants, correspond au rôle particulier joué par les ressources. En effet, celles-ci sont supposées transférables entre les différentes usines lors de la réalisation du PDP au niveau tactique. Par conséquent, il convient de disposer de modèles de planification long terme considérant cette possibilité et, ceci, afin de réduire le nombre total de

ces mêmes ressources à acquérir et, par voie de fait, de diminuer les investissements associés. Or, à notre connaissance, aucun des travaux existants ne permet une telle prise en compte. A ces éléments s'ajoute le fait que très peu d'articles traitent simultanément de paramètres réels rencontrés dans l'industrie tels que le dimensionnement des ressources, la standardisation ou encore l'affectation des productions.

Partant de ce constat, nos travaux ont portés sur la réalisation de modèles pour la résolution du problème ASPDRF comblant les manques de la littérature existante, à savoir :

- (i) la capacité à résoudre des problèmes de grandes tailles ;
- (ii) la prise en compte, lors de la planification stratégique, des transferts de ressources pouvant intervenir au niveau tactique dans le but de diminuer les investissements long terme provenant de leur achat ;
- (iii) la prise en compte simultanée de différents paramètres et contraintes rencontrés dans l'industrie tels que le dimensionnement de la flexibilité, le dimensionnement des ressources, la prise en compte de la standardisation, l'affectation de la production, le caractère incertain de la demande ou encore la prise en compte d'une configuration initiale.

Afin de mener à bien ces travaux, a été défini un MILP pour le problème ASPDRF dans le cas d'une demande déterministe (chapitre 3). Bien que valide, celui-ci n'a pas permis l'obtention de solution pour des instances de grandes tailles ; le nombre de données associées étant trop important. Par conséquent, il s'est avéré nécessaire de construire une métaheuristique adaptée dans le but de permettre la résolution de problème de tailles industrielles (chapitre 4). Celle-ci, prenant la forme d'un GRASP constitué de différentes phases de construction et d'évaluation d'une solution ainsi que d'une recherche locale, a été mise en œuvre sur différentes instances. Ces différents tests ont montré l'efficacité de cette méthode tant en terme de qualité des résultats obtenus que de vitesse d'exécution (une instance dérivée du cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin a pu être résolue en 10 minutes). Ensuite, dans le but de tenir compte de l'incertitude relative à la demande, ce même GRASP a été légèrement modifié dans le but d'être intégré au sein d'un processus de simulation de Monte Carlo (chapitre 5), dont l'efficacité a pu être démontrée à travers, là encore, la réalisation de différents tests.

Au-delà du problème ASPDRF, les travaux conduits durant ce doctorat ont également porté sur la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant, certes, l'horizon stratégique mais également ceux tactique et opérationnel (Chapitre 6). Celui-ci a été décomposé en quatre étapes associées chacune à un horizon de planification. Ainsi, les deux premières, constituées d'un modèle de flot, du GRASP associé au problème ASPDRF dans un contexte incertain ainsi que d'un modèle linéaire, consistent, à définir pour un système de production donné les capacités maximales associées avant de procéder à leur déploiement. Ceci correspond à la définition de la part de ces dernières à utiliser d'une manière courante et de celle à allouer à la flexibilité volume. Pour se faire ont été distingués deux types d'industrie à savoir celle à faible mobilité de la production, pour lesquelles les décisions d'affectation des productions sont difficilement modifiables, et à l'inverse celle à forte mobilité dans le cadre desquelles l'affectation des productions peut être changée périodiquement sans entraîner de surcoûts conséquents. Partant de ces décisions long terme, la troisième étape consiste, quant à elle, à réaliser un Programme Directeur de la Production permettant, au-delà de la définition des quantités de chaque produit à fabriquer sur chaque ligne de production, de valider ou infirmer les différentes décisions stratégiques par leur déclinaison à une maille plus fine. Pour ce faire, a été proposé un modèle de flot maximum à coût minimum permettant la résolution de problèmes de grandes tailles dans des temps relativement courts. Toujours dans le cadre d'une déclinaison des décisions

prises à un niveau sur le niveau inférieur, la quatrième étape de cet environnement intégré de planification correspond, quant à elle, à une évaluation opérationnelle des éléments décidés au niveau tactique. Plus précisément, a été proposé un MILP, permettant à partir des quantités à produire sur chacune des lignes de production, d'établir des plans de charges quotidiens des différentes machines les composants. De par la prise en compte de contraintes plus fines, cette étape offre la possibilité de valider ou, au contraire, infirmer les décisions prises au niveau tactique. Ainsi, en plus de permettre la réalisation des différents processus associés aux horizons stratégique, tactique et opérationnel, notre environnement intégré de planification assure la déclinaison et la validation des décisions d'un niveau (stratégique par exemple) à l'autre (tactique par exemple).

Bien que l'ensemble des modèles et méthodes de résolution, constituant l'intégralité de ses étapes, ait la capacité de résoudre des problèmes de grandes tailles dans des temps relativement courts, notre environnement intégré de planification peut être amélioré en plusieurs points. Tout d'abord, il semble nécessaire d'enrichir la dernière étape de celui-ci par le développement d'un modèle d'ordonnancement de la production ainsi que la construction d'une solution permettant la mise en œuvre d'une démarche de type MRP à partir des décisions prises au niveau tactique. Ceci permettrait en effet d'adresser l'intégralité des décisions relatives au pilotage de la partie « production » d'une Supply Chain, que cela soit au niveau stratégique, tactique ou opérationnel. De plus, afin de faciliter les étapes de déclinaisons des solutions entre les différents niveaux, il apparaît également intéressant d'introduire des solutions permettant d'automatiser ces processus. Ceci concerne surtout le passage de l'horizon tactique à l'horizon opérationnel. En effet, dans ce cadre, il serait utile de construire une méthode propre permettant, à partir des décisions de production mensuelles exprimées pour chacune des lignes de production et en fonction de la demande réelle ainsi que de l'état des stocks, d'automatiser la définition des quantités à produire pour chaque semaine de l'horizon considéré.

Au-delà de ces éléments propres à l'amélioration de l'environnement intégré de planification développé, différentes perspectives d'évolutions de nos travaux peuvent être envisagées. La première concerne la phase de planification du GRASP. En effet, comme indiqué, celle-ci a été construite de manière à satisfaire au maximum la demande ; les différents coûts associés étant calculé à postériori. Or, dans le cadre d'une industrie ne cherchant pas obligatoirement à maximiser l'utilisation de ses capacités, en les adaptant notamment à la demande réelle, mais faisant à chaque période un équilibre entre chiffre d'affaire issu des ventes, coûts engendrés et surcoûts issus de la non saturation des capacités, une telle méthode s'avère inadaptée. Aussi, il convient de la modifier en l'intégrant dans un processus itératif visant à établir une planification guidée par la rentabilité et non par la satisfaction de la demande. Une fois ceci réalisé, la perspective d'évolution immédiate correspond à l'adaptation des méthodes et modèles développés à la prise en compte des parties distributions puis approvisionnement d'une Supply Chain.

Bibliographie

- [Adam et Swamidass, 1989] Adam, E.E., Swamidass P.M. (1989). Assessing operations management from a strategic perspective. *Journal of Management* 15-2, pp. 181-203.
- [Aghezzaf, 2007] Aghezzaf E.H. (2007). Production planning and warehouse management in supply networks with interfacility mold transfers, *European Journal of Operational Research*, 182, pp. 1122-1139.
- [Ahmed and Sahinidis, 2002] Ahmed, S., Sahinidis, N. V. (2002). An approximation scheme for stochastic integer programs arising in capacity expansion. To appear in *Operations Research*.
- [Ahmed et al., 2003] Ahmed S., King A. J., Parija G. (2003). A Multi-Stage Stochastic Integer Programming Approach for Capacity Expansion under Uncertainty, *Journal of Global Optimization* 26, pp 3–24.
- [Ahuja et al., 1993] Ahuja R. K., Magnanti T. L., James Orlin B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice-Hall, Inc.
- [Altıparmak et al., 2009] Altıparmak F., Gen M., Lin Lin, Karaoglan I. (2009). A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design, *Computers & Industrial Engineering* 56, pp 521–537.
- [Andreou, 1990] Andreou, S.A. (1990). A capital budgeting model for product-mix flexibility. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 3, pp. 5–23.
- [Anthony, 1965] Anthony R.N. (1965). *Planning and Control Systems, A Framework of Analysis*, Boston.
- [Amrani et al., 2011] Amrani H., Martel A., Zufferey N., Makeeva P. (2011) .A variable neighborhood search heuristic for the design of multicommodity production–distribution networks with alternative facility configuration. *OR Spectrum* 33-4, pp. 989–1007.
- [Artiba et al., 2011] Artiba A., Kemmoe S., Pernot P.A, Tchernev N. (2011). Flexibility model based on graph theory for supply chain tactical planning : industrial application. 7ème conférence internationale Conception & Production Intégrée, Oujda, Maroc, 19-21 oct. 2011.
- [Askin et al., 2005] Aksin, O.Z., Karaesmen, F., Ormeci, E.L., (2005). On the interaction between resource flexibility and flexibility structures. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Manufacturing Systems—Production Management*, Zakynthos, Greece, May.
- [Azaron et al., 2008] Azaron, A., Brown, K.N., Tarima, S.A., Modarres, M., 2008. A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics* 116, 129–138.
- [Azaron et al., 2009] Azaron, A., Furmans, K., Modarres, M. (2009). Interactive multi-objective stochastic programming approaches for designing robust supply chain networks. In: *Operations*

- Research Proceedings 2008–2009, Part 5, pp.173–178, doi: 10.1007/ 978-3-642-00142-0_28.
- [Badri et al., 2012] Badri H., Bashiri M. and Hejazi T. H.(2012). Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method, *Computers & Operations Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.11.005>.
- [Baghalian et al., 2013] Baghalian A., Rezapour S., Farahani R.Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research* 227, pp. 199–215.
- [Balinski, 1961] Balinski M. (1961). Fixed-cost transportation problems. *Naval Research Logistics Quarterly* 8, pp 41–54.
- [Baud-Lavigne et al., 2011] Baud-Lavigne B., Agard B., Penz B. (2011). A MILP model for joint product family and supply chain design. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, 25-27 May, Metz, France.
- [Barro and Canestrelli, 2005] Barro D., Canestrelli E. (2005). Dynamic portfolio optimization: Time decomposition using the maximum principle with a scenario approach. *European Journal of Operational Research* 163, pp217-229.
- [Beach et al., 2000] Beach R., Muhlemann A.P., Price D.H.R., Paterson A., Sharp J.A. (2000). A review of manufacturing flexibility, *European Journal of Operational Research* 122, pp.41-57.
- [Beamon, 1998] Beamon B. M. (1998). Supply Chain design and analysis: Model and methods. *Int. J. Production Economics* 55, pp 281-294.
- [Benders, 1962] Benders J.F. (1962). Partitioning procedures for solving mixed variables programming problems, *Numer. Math.* 4, pp238–252.
- [Bengtsson and Olhager, 2002] Bengtsson J., Olhager J. (2002). The impact of the product mix on the value of flexibility. *Omega* 30, pp. 265-273.
- [Benjaafar and Gupta, 1998] Benjaafar S., Gupta D. (1998). Scope versus Focus: Issue of Flexibility, Capacity, and Number of Production Facilities. *IIE Transactions* 30 (5), pp. 413-425.
- [Bernardes and Hanna, 2009] Bernardes E.S., Hanna M.D. (2009). *International Journal of Operations & Production Management* 29-1, pp. 30-53.
- [Bertrand, 2003] Bertrand J.W.M. (2003). Supply Chain Design: Flexibility Considerations. De Kok A.G., Graves, S.C., (Eds). *Handbooks in OR & MS*, 11, chapter 4.
- [Bhutta and al., 2003] Bhutta, K.S., Huq F., Frazier G., Mohamed Z. (2003). An Integrated Location, Production, Distribution and Investment Model for a Multinational Corporation. *International Journal of Production Economics* 86, pp. 201-216.
- [Bihandi and Yusuff, 2011] Bihandi H. M., Yusuff R. M. (2011). Integrated supply chain under demand uncertainty using an improved stochastic approach, *Applied Mathematical Modelling* 35, pp. 2618-2630.

- [Birge and Louveau, 1997] Birge J.R. et Louveaux F. (1997). *Introduction to Stochastic Programming*, Springer.
- [Bok et al., 2008] Bok, J., Lee H., Park S. (1998). Robust investment model for long-range capacity expansion of chemical processing networks under uncertain demand forecast scenarios. *Computers and Chemical Engineering* 22-7, pp.1037-1049.
- [Botta-Genoulaz, 2005] Botta-Genoulaz V. (2005). *Principes et Méthodes pour l'Intégration et l'Optimisation du pilotage des Systèmes de Production et des Chaînes Logistiques*. Rapport de HDR, tome 1, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon et Université Claude Bernard de Lyon 1.
- [Bowersox et al., 1980] Bowersox D., Cooper M., Lambert D., Taylor D. (1980). *Management in Marketing Channels*, Mc Graw Hill, New York.
- [Bowersox and Closs, 1996] Bowersox D., Closs D. (1996). *Logistical management: the integrated supply chain*. New York. mc Milan Publishing.
- [Boyer and Keong Leong, 1996] Boyer, K.K., Keong Leong G. (1996). Manufacturing flexibility at the plant level. *Omega* 24-5, pp. 495–510.
- [Browne et al., 1984] Browne J., Dubois D., Rathmill K., Sethi S.P., Stecke K.E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *FMS Mag*, August, pp. 114–117.
- [Brown et al., 1987] Brown G.G., Graves G.W., Honczarenko M.D. (1987). Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition. *Management Science* 33-11, pp 1469-1480.
- [Cachon and Lariviere, 2001] Cachon, G.P., M.A. Lariviere (2001). Contracting to assure supply: how to share demand forecasts in a supply chain. *Management Science* 47(5), pp. 629–646.
- [Carle et al., 2012] Carle M.A., Martel A., Zufferey N. (2012). The CAT metaheuristic for the solution of multi-period activity based supply chain network design problems. *International Journal Production Economics* 139, pp 664-677.
- [Chandra et al., 2005] Chandra C., Everson M., Rabis J. (2005). Evaluation of enterprise-level benefits of manufacturing flexibility. *Omega* 33, pp 17-31.
- [Chan, 2003] Chan F.T.S. (2003). Performance Management in a Supply Chain. *International Journal of Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 534-548.
- [Chan and Chan, 2005] Chan F.T.S., Chan H. K. (2005). The future trend on system-wide modelling in supply chain studies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25, pp. 820.
- [Christopher and Peck, 2004] Christopher M. Peck H. (2004). Building the Resilient Supply Chain. *International Journal of Logistics Management* 15-2, pp. 1-13.
- [Chou et al., 2008] Chou M.C., Teo C.P., Zheng H. (2008). Process flexibility: design, evaluation, and applications. *Flex Serv Manuf J*, 20; pp. 59–94.
- [Christopher, 1992] Christopher M. (1992). *Logistics and Supply Chain Management*, Pitman Publishing, London.

- [Clay and Grossmann, 1997] Clay R., Grossmann I.E.(1997). A disaggregation algorithm for the optimization of stochastic planning models. *Computers and Chemical Engineering* 21, pp 751-774.
- [Cohen and Lee,1989] Cohen M.A., Lee H.L. (1989). Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks, *Journal of Manufacturing and Operations Management* 2, pp. 81-104.
- [Cohen et al., 1989] Cohen, M.A., Fisher, M.L., Jaikumar, R. (1989). International manufacturing and distribution networks: a normative model framework. In: Ferdows, K. (Ed.), *Managing International Manufacturing*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, pp. 67–93.
- [Cole, 1995] Cole M.H. (1995). *Service Considerations and the Design of Strategic Distribution Systems*. Travaux de these, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA.
- [Colin, 2004] Colin J. (2004). *La logistique du point de vue des Sciences de Gestion. La logistique entre Management et Optimisation*, Lièvre P., Tchernev N. Eds, Hermès Sciences, Paris.
- [Cordeau et al., 2006] Cordeau, J.-F., Pasin F. et Solomon M. (2006). An Integrated Model for Logistics Network Design. *Annals of Operations Research* 144, pp. 59-82.
- [Correia et al., 2012] Correia I., Melo, T., Saldanha-da-Gamac, F. (2012). Comparing classical performance measures for a multi-period, two-echelon supply chain network design problem with sizing decisions, *Computers & Industrial Engineering*.
- [Croom et al., 2000] Croom S., Romano P., Giannakis M. (2000). Supply Chain Management: an analytical framework for critical literature review. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 6-1, pp. 67-83.
- [Das and Abdel-Malek, 2003] Das S.K., Abdel-Malek L. (2003). Modeling the flexibility of order quantities and lead-times in supply chains. *Int. J. Production Economics* 85, pp. 171–181.
- [Das, 2011] Das K. (2011). Integrating effective flexibility measures into a strategic supply chain planning model. *European Journal of Operational Research* 211, pp. 170-183.
- [Daskin et al., 1992] Daskin, M.S., Hopp W.-J. et Medina B. (1992). Forecast Horizons and Dynamic Facility Location Planning. *Annals of Operations Research* 40, pp. 125-151.
- [Davis, 1993] Davis T. (1993). Effective supply chain management. *Sloan Management Review*; 34-4, pp. 35–46.
- [Drud, 1985] Drud A. (1985). CONOPT-A CRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems. *Math. Programming* 31, pp. 153.
- [Elson, 1972] Elson D.G. (1972). Site Location via Mixed-Integer Programming. *Operational Research Quarterly* 23-1, pp 31-43.
- [Erlenkotter, 1981] Erlenkotter D. (1981). A comparative study of approaches to dynamic location problems. *European Journal of Operational Research* 6, pp. 133-143.

- [Feo and Resende, 1989] Feo T.A., Resende M.G.C. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters* 8, pp. 67-71.
- [Feo and Resende, 1995] Feo T.A., Resende M.G.C. (1995). Greedy randomized adaptative search procedures. *Journal of Global Optimization* 6, pp. 109-133.
- [Festa and Resende, 2002] Festa P., Resende M.G.C. (2002). GRASP: An annotated bibliography. In Ribeiro, C.C., Hansen, P., (Eds.), *Essays and Surveys on Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, pp. 325-367.
- [Fine and Freund, 1990] Fine C.H., Freund R.M. (1990). Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Management Science* 36-4, pp. 449-466.
- [Fleischmann et al., 2002] Fleischmann, B., Meyr, H., Wagner, M. "Advanced Planning", in *Supply chain management and advanced planning*, Stadtler, H., Kilger, C., (Eds), chapter 4, Berlin, Springer Verlag, 2002.
- [Filser, 2000] Filser M. (2000). Les theories du canal de distribution : le dualisme des paradigmes. Ouvrage collectif « Faire de la Recherche en Logistique et Distribution ? » coordonné par N. Fabbes Costes, J. Colin et G. Paché, FNGE, Vuibert.
- [Fixson, 2007] Fixson S.K. (2007). Modularity and Commonality Research: Past Development and Future Opportunities. *Concurrent Engineering*, 15-2, pp85-11.
- [Forrester, 1961] Forrester J.W. (1961). *Industrial Dynamics*, MIT, Press, USA.
- [Francas et al., 2011] Francas D., Löhdorf N., Minner S. (2011). Machine and labor flexibility in manufacturing networks, *Int. J. Production Economics* 131, pp. 165-174.
- [Frazelle, 2001] Frazelle E.H. (2001). *Supply Chain Strategy*, Mac Graw Hill, Logistics Management Library.
- [Gebennini et al., 2009] Gebennini E., Gamberini R., Manzini R. (2009). An integrated production-distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal Production Economics* 122, pp. 286-304
- [Geoffrion and Graves, 1974] Geoffrion A. M., Graves G.W. (1974). Multicommodity Distribution System design by Benders Decomposition. *Management Science* 20-5, pp 822-844.
- [Geoffrion et al., 1978] Geoffrion A. M., Graves G.W., Lee S.J. (1978). Strategic Distribution system planning: a status report. In A.C. Hax, ed., *Studies in Operations Management*, North-Holland, Amsterdam, pp.179-204.
- [Geoffrion et al., 1982] Geoffrion A. M., Graves G.W., Lee S.J. (1978). A management support system for distribution planning, *INFOR* 20-4, pp 287-314.
- [Georgiadis et al., 2011] Georgiadis M.C., Tsiakis P., Longinidis P., Sofioglou M.K. (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega* 39, pp. 254-272.

- [Gerwin, 1987] Gerwin D. (1987). An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes. *International Journal of Operations & Production Management* 7(1), pp. 38-49.
- [Gerwin, 1993] Gerwin, D., 1993. Manufacturing flexibility: A strategic perspective. *Management Science* 39 (4), pp. 395-408.
- [Glover, 1986] Glover F. (1986). Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research* 5, pp. 553-549.
- [Gong, 2008] Gong Z., (1998) An economic evaluation model of supply chain flexibility. *European Journal of Operational Research* 184, pp. 745-758.
- [Graves and Tomlin, 2003] Graves S.C., Tomlin B.T. (2003). Process flexibility in supply chain. *Manage Science* 49-7, pp. 907-919.
- [Gruat La Forme-Chretien, 2007] Gruat La Forme-Chretien F.A. (2007). Référenciel d'évaluation de la performance d'une chaîne logistique – Application à une entreprise de l'ameublement, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [Gupta et al., 1992] Gupta D., Gerchakb Y., Buzacott J. A. (1992). The optimal mix of flexible and dedicated manufacturing capacities hedging against demand uncertainty. *International Journal of Production Economics* 28, pp. 309-319.
- [Guillén et al., 2005] Guillén G., Mele F.D., Bagajewicz M.J., Espuña A., Puigjaner L. (2005), Multiobjective supply chain design under uncertainty; *Chemical Engineering Science* 60, pp.1535 – 1553.
- [Gutierrez et al., 1996] Gutierrez G.J., Kouvelis P., Kurawala A. (1996). A robustness approach to uncapacitated network design problems. *European Journal of Operational Research* 94, pp. 362-376.
- [El Hadj Khalaf et al., 2009] El Hadj Khalaf, R., Agard, B., Penz, B. (2009). An experimental study for the selection of modules and facilities in a mass customization context. *Journa of Intelligent Manufacturing*, Vol 21, 703-716.
- [Holland, 1975] Holland J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- [Hoyland et al., 2003] Hoyland K., Kaut M., Wallace S.W. (2003). A heuristic moment-matching scenario generation. *Computational Optimization and Applications* 24, pp 169-185.
- [Hinojosa et al., 2000] Hinojosa Y., Puerto J., Fernandez F.R. (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research* 123, pp 271-291.
- [Jahangirian et al., 2010] Jahangirian M., Eldabi T., Naseer A., Stergioulas L., Young T. (2010). Simulation in manufacturing and business : a review”, *European journal of operational research* 203, pp 1-13.
- [Jayaraman et Pirkul ,2001] Jayaraman V., Pirkul H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities, *European Journal of Operational Research* 133, pp. 394-408.

- [Jones et al., 2002] Jones D.F., Mirrazavi S.K.; Tamiz M. (2002). Multi-objective meta-heuristics : An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research* 137, pp.1-9.
- [Jordan and Graves, 1995] Jordan W. C., Graves, S. C. (1995). Principles on the benefits of manufacturing process flexibility. *Management Science*, 1995, 41-4, pp.577-594.
- [Karuppiah et al., 2010] Karuppiah R, Marti'n M, Grossmann IE. (2010). A simple heuristic for reducing the number of scenarios in two-stage stochastic programming. *Computers and Chemical Engineering*, 34-8, pp 1246–55.
- [Kaufman et al., 1977] Kaufman L., Vanden Eede M. et Hansen P. (1977). A Plant and Warehouse Location Problem. *Operational Research Quarterly* 28-3, pp. 547-554.
- [Kemmoé et al., 2012] Kemmoé S., Pernot P.A., Tchernev N. (2012). 4ème conférence internationale sur les systèmes d'Information, la Logistique et la Supply Chain (ILS), Quebec (Canada), 26-29 Août 2012.
- [Kemmoé et al., 2013] Kemmoé S., Pernot P.A., Tchernev N. (201X). Manufacturing supply chain strategic planning : flexibility evaluation *International Journal of Production Research* (accepté sous réserve de modifications).
- [Khoste and Malhotra, 1999] Khoste, L.L., Malhotra M.K. (1999). A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management* 18, pp.75-93.
- [Kibli et al., 2010] Kibli W., Martel A., Guitouni A. (2010) .The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research* 203, pp 283–293.
- [Kirkpatrick et al., 1983] Kirkpatrick S., Velatt C.D., Vecchi M.P. (1983). Optimization by simulated Annealing, *Sciences* 222, pp. 671-680.
- [Kleywegt et al., 2001] Kleywegt, Shapiro A., Homem-De-Mello T. (2001). The sample average approximation method for stochastic discrete optimization. *SIAM J. Optim.* 12, pp. 479-502.
- [Klose and Drexl, 2005] Klose A., Drexl A. (2005). Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research* 162, pp. 4–29.
- [Knight, 1921] Knight, F.H. (1921). Risk, Uncertainty, and Profit. Houghton Mifflin, Boston and New York, web- site Edition: <http://www.econlib.org/library/Knight/knRUP.html>.
- [Kouvelis and Yu, 1997] Kouvelis P., Yu G. (1997). Robust discrete optimization and its applications. Kluwer Academic Publishers.
- [Kumar et al., 2006] Kumar V., Fantazy K.A., Kumar U., Boyle T.A. (2006). Implementation and management framework for supply chain flexibility. *Journal of Enterprise Information Management* 19(3), pp. 303-319.
- [Lapide, 2000] Lapide L. (2000). What about Measuring Supply Chain Performance? AMR research – Lapide, ascet.com.

- [Lamothe et al., 2006] Lamothe J., Hadj-Hamou K., Aldanondo M. (2006). An optimization model for selecting a product family and designing its supply chain. *European Journal Of Operational Research* 169(3), pp.1030-1047.
- [Lempert et al., 2006] Lempert, R.J., Groves D.G., Popper S.W., Bankes S.C., (2006). A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios. *Management Science* 52-4, pp. 514-528.
- [Leung et al., 1997] Leung S. C. H., Tsang S. O.S., Ng W.L., Wu Y. (2007). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment, *European Journal of Operational Research* 181, pp.224-238.
- [Lin and Wang, 2011] Lin C-C., Wang T-H. (2011). Build-to-order supply chain network design under supply and demand uncertainties. *Transportation Research: Part B* 45-8, pp.1–15.
- [Li and Kouvelis, 1999] Li C., Kouvelis P. (1999). Flexible and risk-sharing supply contracts under price uncertainty. *Management Science* 45-10, pp. 1378–1398.
- [Longinidis and Georgiadis, 2011] Longinidis P., Georgiadis M.C. (2011). Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty. *Int. J. Production Economics* 129, pp. 262–276
- [Lummus et al., 2003] Lummus R.R., Duclos L.K., Vokurka R.J. (2003). Supply Chain flexibility: building a new model. *Global Journal of Flexible System Management* 4-4, pp. 1-13.
- [Lysons and Gillingham, 2003] Lysons K., Gillingham M. (2003). *Purchasing and Supply Management*, 6th edition, Prentice Hall.
- [Mak et al., 1999] Mak W.K., Morton D.P., Wood R.K. (1999). Monte Carlo bounding techniques for determining solution quality in stochastic programs. *Operations research Letters* 24, pp 47-56.
- [Mahapatra and Melnyk, 2000] Mahapatra S., Melnyk S.A. (2003). Supply Chain flexibility: toward an integrated framework. *Decision Sciences Institute Annual Meeting*, pp. 22-25.
- [Mandelbaum and Buzacott, 1990] Mandelbaum M., Buzacott A. (1990). Flexibility and decision making. *European Journal of Operation Research*, 44 (1), pp 17-27.
- [Manzani et al., 2008] Manzani R., Gamberi M., Gebennini E., Regattieri A., (2008). An integrated approach to the design and management of a supply chain system, *Int. Journal Advance Manufacturing Technology* 37, pp 625-640.
- [Manzani and Gamberini, 2008] Manzani, R., Gamberini, R. (2008). Design, management and control of logistic distribution systems. In: Kordic, Vedran (Eds.), *Supply Chains: Theory and Applications*. International Journal of Advanced Robotic Systems, (Chapter 15, Published by I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria. ISBN: 978-3-902613), pp. 263–290.
- [Matos, 2007] Matos M.A., 2007. Decision under risk as a multicriteria problem. *European Journal of Operational Research* 181, pp. 1516–1529.

-
- [Mladenovic and Hansen, 1997] Mladenovic N., Hansen P. (1997). Variable Neighborhood Search. *Computers & Operations Research* 24, pp. 1097-1100.
- [Meixel and Gargeya, 2005] Meixel M.J. et Gargeya V.B. (2005). Global supply chain design: A literature review and critique. *Transportation Research Part E* 41, pp. 531-550.
- [Melo et al., 2005] Melo M.T., Nickel S., Saldanha da Gama F. (2005). Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operational Research* 33, pp. 181-208.
- [Melo et al., 2009] Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-gama F. (2009). Facility location and supply chain management – a review. *European Journal of Operational Research*, pp 401-412.
- [Metropolis and Ulam, 1949] Metropolis N., Ulam S. (1949). The Monte Carlo Method, *Journal of the American statistical association*
- [Mirchandani and Francis, 1990] Mirchandani P.B. et Francis R.L. (1990). *Discrete Location Theory*, New York, John Wiley & Sons.
- [More and Babu, 2009a] More D., Babu A.S. (2009). Supply chain flexibility: a state-of-the art survey. *Int. J. Services and Operations Management*, Vol. 5(1), pp. 29-65.
- [More and Babu, 2009b] More, D., Babu, A.S. (2009 b). Analysis of the dynamics between supply chain flexibility and key management ratios. *Int J. Business Innovation and Research* vol. 3 no 2, pp. 100-227.
- [Mulvey et al., 1995a] Mulvey J.M., Vanderbei R.J., Zenios S.A. (1995 a). Robust optimization of large-scale systems, *Operations Research* 43-2, pp. 264-281.
- [Mulvey et al., 1995b] Mulvey J.M., Ruszczyński A. (1995 b). A new scenario decomposition method for large-scale stochastic optimization, *Operations Research* 43-3, pp. 477-490.
- [Norman and Jansson, 2004] Norman A., Jansson U. (2004). Ericsson's Proactive Supply Chains Risk Management Approach After a Serious Sub-Supplier Accident. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 34- 5, pp. 434-456.
- [Nelson, 1967] Nelson R.T. (1967). Labor and machine limited production systems. *Management Science* 13-9, pp. 648-671.
- [Osman, 1997] Osman I.H. (1997). An introduction to Metaheuristics". In Lawrence M., Wilson C. (eds), *Operational Research Tutorial Papers*, Operational Research Society Press, Birmingham, UK, pp. 92-122.
- [Osman and Laporte, 1996] Osman I.H., Laporte G. (1996). Metaheuristics : A bibliography. *Annals of Operations Research* 63, pp. 513-628.
- [Owen and Daskin, 1998] Owen, S.H. et Daskin M.S. (1998). Strategic Facility Location: A Review. *European Journal of Operational Research* 111, pp. 423-447.
- [Paquet et al., 2004] Paquet M., Martel A., Desaulnier G. (2004). Including technology selection decisions in manufacturing network design models. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 17, pp 117-125.

- [Paquet et al., 2008] Paquet M., Martel A., Montreuil B. (2008). A manufacturing network design model based on processor and workers capabilities. *International Journal of Production Research* 46-7, pp 2009-2030.
- [Pernot et al., 2013] Pernot P.A., Tchernev N., Kemmoe S. (2013). Planification stratégique: dimensionnement de la flexibilité sous incertitude. 10^{ème} Congrès international de Génie Industriel. La Rochelle, 12-14 juin 2013.
- [Pishvaei et al., 2011] Pishvaei M. S., Rabbani M., Torabi S.A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling* 35, pp 637–649.
- [Rosenhead et al., 1972] Rosenhead J., Elton M. and Gupta S.K., 1972. Robustness and Optimality as criteria for Strategic Decisions. *Operational Research Quarterly* 23-4, pp. 413
- [Santoso et al., 2005] Santoso T., Ahmed S., Goetschalckx M., and Shapiro A., 2005. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research* 167, pp. 96-115.
- [Resende and Ribeiro, 2002] Resende M.G.C., Ribeiro C.C. (2002). Greedy randomized adaptive search procedures. In: Glover, F., Kochenberger, G. (Eds.), *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, pp. 219-249.
- [Ridlehoover, 2004] Ridlehoover J., 2004. Applying Monte Carlo Simulation and risk analysis to the facility location problem. *The Engineering Economist* 49-3, pp.237-252.
- [Sahinidis, 2004] Sahinidis N. V.(2004). Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering* 28, pp. 971–983.
- [Samii, 2001] Samii A.K. (2001). *Stratégies logistiques – Fondements, méthodes, applications*. 2^{ème} ed., Dunod, Paris.
- [Schneider et al., 2013] Schneider M., Grahl J., Francas D., Vigo D. (2013). A problem-adjusted genetic algorithm for flexibility design. *International Journal Production Economics* 141, pp. 56-65.
- [Schütz et al., 2009] Schütz P., Tomasgard A., Ahmed S. (2009). Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European Journal of Operational Research* 199, pp. 409–419.
- [Sethi and Sethi, 1990] Sethi, A.K., Sethi, P.S. (1990). Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2, pp. 289-328.
- [Shapiro, 1999] Shapiro JF (1999). On the connections among activity-based costing, mathematical programming models for analyzing strategic decisions, and the resource-based view of the firm. *European Journal of Operations Research* 118-2, pp. 295–314.
- [Shapiro, 2007] Shapiro A. (2007). Stochastic programming approach to optimization under uncertainty. *Mathematical Programming: Series A and B* 112-1, pp. 183-220.

-
- [Shen, 2006] Shen Z.J.M. (2006). A profit maximizing supply chain network design model with demand choice flexibility. *Operations Research Letters* 34, pp. 673–682.
- [Shen, 2007] Shen Z.- J., 2007. Integrated Supply Chain Design Models: A survey and future research directions. *Journal of Industrial and Management Optimization* 3-1, pp. 1-27.
- [Shuiabi et al., 2005] Shuiabi E., Thomson V., Bhuiyan N. (2005). Entropy as a measure of operational flexibility . *European Journal of Operational Research* 165-3, pp. 696-707.
- [Shulman, 1991] Shulman, A. (1991). An Algorithm for Solving Dynamic Capacitated Plant Location Problems with Discrete Expansion Sizes. *Operations Research* 39-3, pp. 423-436.
- [Simchi-Levi et al., 2004] Simchi-Levi D., Kaminsk P., Simchi-Levi E. (2004). *Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional*. McGraw-Hill, New-York.
- [Slack, 1983] Slack N. (1983). Flexibility as a manufacturing objective. *International Journal of Operations & Production Management* 3(3), pp. 4-13.
- [Smith, 2003] Smith J. S. (2003). Survey on the use of simulation for manufacturing system design and operation. *Journal of Manufacturing Systems* 22-2, pp. 157-171.
- [Snyder, 2006] Snyder L.V. (2006). Facility location under uncertainty: A review. *IIE Transactions* 38, 7, pp 537-554.
- [Snyder and Daskin, 2006] Snyder, L.V., Daskin M. S. (2006). Stochastic p-Robust location problems. *IIE Transactions* 38, 11, 971-985.
- [Stadler and Kilger, 2001] Stadler H., Kilger C. (2001). *an overview in Supply Chain Management and Advanced Planning*, Springer.
- [Stecke, 1983] Stecke KE (1983) Formulation and solution of nonlinear integer production planning problems for flexible manufacturing systems. *Management Science* 29-3; pp. 273–288.
- [Stevenson and Spring, 2007] Stevenson M., Spring M. (2007). Flexibiity from a Supply Chain perspective: definition and review. *International Journal of Production and Operations Management*, 27(7), pp 685-713.
- [Stewart, 2005] Stewart, T.J., 2005. Dealing with uncertainties in MCDA. Chapter 11 in *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, edited by J. Figueira, S. Greco and M. Ehrgott, Springer international series.
- [Stradler and Kilger, 2002] Stradler H., Kilger C. (2002). *Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models, Software and Case Studies*, New Delhi, India: Springer International Edition.
- [Swamidass et al., 1987] Swamidass P. M., Newell W. T. (1987). Manufacturing strategy, environmental uncertainty and performance: a path analytic model. *Management Science* 33 (4), pp. 509-524.
- [Swamidass and Newell, 1987] Swamidass P. M., Newell W. T. (1987). Manufacturing strategy, environmental uncertainty and performance: a path analytic model. *Management Science* 33-4, pp. 509-524.

- [Tang, 2006] Tang C.S., (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics* 103, pp. 451–488.
- [Tang and Tomlin, 2008] Tang C., Tomlin B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *Int J. Production Economics* 116, pp. 12-27.
- [Tan, 2001] Tan K.C. (2001). A framework of supply Chain management literature. *European Journal of Purchasing & Supply Management* 7, pp. 39-48.
- [Tchernev, 2003] Tchernev N. (2003). Approvisionnement et logistique, Manuel de l'étudiant, Institut Universitaire Professionnalisé Management et Gestion de l'Entreprise, Université d'Auvergne.
- [Terzi and Cavalieri, 2004] Terzi S., Cavalieri S. (2004). Simulation in the supply chain context: A survey. *Computers in Industry* 53 (1), pp 3-16.
- [Thomas, 2003] Thomas A. (2003). Université d'été, ENSGI.
- [Tixier et al., 1979] Tixier D., Mathe J., Colin J. (1983). La logistique au service de l'entreprise, Dunod, Paris.
- [Tsiakis et al., 2001] Tsiakis P., Shah N., Pantelides C. C. (2001). Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Ind. Eng. Chem Res.* 40, pp. 3585-3604.
- [Upton, 1994] Upton, D. M., (1994) The management of manufacturing flexibility. *California Management Review* Winter, pp. 72-89.
- [Van der Zee et Van der Vost, 2005] Van der Zee D.J., Van der Vost J.G.A.J. (2005). A modelling framework for supply chain simulation: opportunities for improved decision making . *Decision Science* 36 (1), pp65-95
- [Vidal and Goetschalckx, 1997] Vidal L.C., Goetschalckx M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98-1, pp. 1-18.
- [Vickery et al., 1999] Vickery, S., Calantone, R., and Dröge, C., (1999). Supply chain flexibility: an empirical study. *Journal of Supply Chain Management*, 35(3), 16-24.
- [Vila et al., 2009] Vila, D., Martel A. and Beauregard R. (2009). The Strategic Design of Forest Industry Supply Chains. *INFOR* 47-3, pp 185-202.
- [Verter and Dincer, 1992] Verter V, Dincer MC. An integrated evaluation of facility location, capacity acquisition and technology selection for designing global manufacturing strategies. *European Journal of Operational Research* 1992;70:1}18.
- [Verter, 2002] Verter V., 2002. An integrated model for facility location and technology acquisition. *Computers & Operations Research* 29, pp583-592.
- [Volling et al., 2013] Volling T., Matze A., Grunewald M., Splenger T. (2013). Planning of capacities and orders in built-to-order automobile production: A review. *European Journal of operational research*, 224, pp. 240-260.
- [Wang and Chen, 2009] Wang K.-J., Chen M.-J. (2009). Cooperative capacity planning and resource allocation by mutual outsourcing

- using ant algorithm in a decentralized supply chain. *Expert Systems with Applications* 36, pp. 2831-2842.
- [Wang and Chuu, 2004] Wang R.C., Chuu S.J. (2004). Group decision-making using a fuzzy linguistic approach for evaluating the flexibility in a manufacturing system. *European Journal of Operational Research* 154-3, pp. 563-572.
- [Wayson, 1965] Wayson R.D. (1965). The effects of alternative machines on two priority dispatching disciplines in the general job shop, Master Thesis Cornell University, New York.
- [Williams, 1981] Williams J.F. (1981). Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons. *Management Science* 27-3, pp. 336-352.
- [Wong and Rosenhead, 2000] Wong H-Y., Rosenhead J. (2000). A rigorous definition of robustness analysis. *Journal of the operational research society* 51, pp. 176-182.
- [Yu et Li, 2000] Yu C.-S., Li H.-L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics* 64, pp. 385-397.

Annexes

Annexe 1 : Algorithme de planification de la production par agrégation de la demande.....	245
Annexe 2 : Algorithme de planification de la production par répartition de la production.....	246
Annexe 3 : Algorithme associé au processus de constitution des stocks	247
Annexe 4 : Algorithme de recherche locale – suppression des multi-affectations	249
Annexe 5 : Algorithme de recherche locale – suppression des modifications d’affectation non pertinentes	250
Annexe 6 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d’une industrie à faible mobilité de la production – modèle de flot mono-période	251
Annexe 7 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d’une industrie à forte mobilité de la production	253

Annexe 1 : algorithme de planification de la production par agrégation de la demande

Partie 3.3.3.3 du chapitre IV

Algorithme 18 : processus de planification « par agrégation de la demande »

Procédure Production_Agrégation_Demande (p,t)

Début

```

1.  instructions identiques aux lignes 1 à 16 de Production_Au_Plus_Juste
2.  si inter_Prod > qte_A_Produire[p][t] && capacité[p][l]=1 &&
    (famille_Pdte[f][t]=1 OU
    nb_Famille[l][t] < nb_Max_Famille[l]) alors
3.    prod ← qte_A_Produire[p][t]
4.    t_bis ← t+1
5.    tant que prod < max(t_camp[p], vol_min[l]) && t_bis < nb_Période+1 faire
6.      prod ← prod + qte_A_Produire[p][t+1]
7.      t_bis ← t_bis + 1
8.    fin tant que
9.    si prod ≥ max(t_camp[p], vol_min[l]) alors
10.     si inter_Prod ≥ prod alors
11.      instructions identiques aux lignes 19 à 39 de de
        Production_Au_Plus_Juste(pt) en remplaçant qte_A_Produire[p][t]
        par prod
12.      qte_A_Produire[p][t] ← 0
13.     sinon
14.      prod_Bis ← prod - inter_Prod
15.      si famille_Pdte[f][t+1]=1 OU prod_LP[l][t+1]=0 alors
16.        diminution_Capa_Temp_Bis ← 0
17.      sinon
18.        diminution_Capa_Temp_Bis ← p_Capa
19.      fin si
20.      si (ressources_Restantes[p][t+1] ≥ ressources_Min[l] OU
          ressource_Usine[u][p][t+1]>0) &&
          (min(ressources_Restantes[p][t+1] x prod_R[p] +
            capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t+1] ;
            capa_L_Prod[l][t+1] - diminution_Capa_Temp_Bis) ≥
            prod_Bis) && (famille_Pdte[f][t]=1 OU
            nb_Famille[l][t] < nb_Max_Famille[l]) alors
21.        instructions identiques aux lignes 19 à 38 de
          Production_Au_Plus_Juste(p,t) en remplaçant
          qte_A_Produire[p][t] par inter_Prod
22.        qte_A_Produire[p][t] ← 0
23.        instructions identiques aux lignes 19 à 39 de
          Production_Au_Plus_Juste(p,t) en remplaçant
          qte_A_Produire[p][t] par prod_Bis et t par t+1
24.      fin si
25.    fin si
26.  fin si
27. fin si
28. instructions identiques aux lignes 41 à 45 de
    Production_Au_Plus_Juste(p,t)

```

Fin

Annexe 2 : algorithme de planification de la production par répartition de la production

Partie 3.3.3.4 du chapitre IV

Algorithme 19 : processus de planification « par répartition de la production »

Procédure Production_Répartition_L_Prod(p, t)

Début

```
1.  instructions identiques aux lignes 1 à 17 de Production_Au_Plus_Juste
2.  si  $inter\_Prod > \max(t\_camp[p], vol\_min[l])$  &&  $capabilité[p][l]=1$  &&
    ( $famille\_Pdte[f][t]=1$  OU  $nb\_Famille[l][t] < nb\_Max\_Famille[l]$ ) alors
3.      si  $inter\_Prod < qte\_A\_Produire[p][t]$  alors
4.          instructions identiques aux lignes 19 à 39 de
              Production_Au_Plus_Juste( $p, t$ ) en
              remplaçant  $qte\_A\_Produire[p][t]$  par  $inter\_Prod$ 
5.           $qte\_A\_Produire[p][t] \leftarrow qte\_A\_Produire[p][t] - inter\_Prod$ 
6.      fin si
7.  sinon
8.      si  $qte\_A\_Produire[p][t] > \max(t\_camp[p], vol\_min[l])$  alors
9.          instructions identiques aux lignes 19 à 39 de
              Production_Au_Plus_Juste( $p, t$ )
10.          $qte\_A\_Produire[p][t] \leftarrow 0$ 
11.      fin si
12.  fin si
13.  instructions identiques aux lignes 41 à 45 de
      Production_Au_Plus_Juste( $p, t$ )
```

Fin

Annexe 3 : algorithme associé au processus de constitution des stocks

Partie 3.3.4 du chapitre IV

Algorithme 20 : processus de constitution des stocks

Procédure Constitution_Stocks()

Début

```

1.  pour t=1 à nb_Période faire
2.      ordre_Décroissant_Demande_Restante(t, liste_Ag_Pdt)
3.      pour j=1 à nb_Ag_Pdt_Tot faire
4.          p←liste_Ag_Pdt[j]
5.          t_bis←t
6.          somme_Prod←qtés_A_Produire[p][t]
7.          tant que t_bis > 0 && qtés_A_Produire[p][t] > 0 && t-t_bis <
                                nb_Période_stock_Max faire

8.              si t_bis ≤ t alors
9.                  somme_Prod←somme_Prod + qtés_A_Produire[p][t_bis]
10.             fin si
11.             k←0
12.             tant que k < affectation[p].size() && qtés_A_Produire[p][t] > 0
                                && qtés_A_Produire[p][t_bis] > 0 faire
13.                 u←affectation[p]
14.                 f←famille[p]
15.                 h←0
16.                 tant que h < ligne_Prod_Utilisées[p][t_bis].size() &&
                                somme_Prod > 0 && qtés_A_Produire[p][t_bis] > 0
17.                     l←ligne_Prod_Utilisées[p][t_bis][h]
18.                     inter_Prod←min(ressources_Restantes[p][t] x
                                prod_Ressource[p]+capa_Ressource_Restant_Usine[u][p][t]
                                ;capa_L_Prod[l][t]) faire
19.                     si inter_Prod > 0 alors
20.                         si inter_Prod > somme_Prod alors
21.                             idem lignes 19 à 39 de Production_Au_Plus_Juste(p,t)
                                en remplaçant t par t_bis et qtés_A_Produire[p][t]
                                par somme_Prod
22.                             t_bis_bis=t_bis ;
23.                             tant que somme_Prod>0 faire
24.                                 somme_Prod←somme_Prod-
                                    qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]
25.                                 qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]←0
26.                                 stock[p][t_bis_bis]←somme_Prod
27.                                 t_bis_bis←t_bis_bis+1
28.                             fin tant que
29.                         sinon
30.                             idem lignes 19 à 39 de Production_Au_Plus_Juste(p,t)
                                en remplaçant t par t_bis et qtés_A_Produire[p][t]
                                par inter_Prod
31.                             tant que inter_Prod > 0 faire
32.                                 si inter_Prod > qtés_A_Produire[p][t_bis_bis] alors
33.                                     inter_Prod←inter_Prod-
                                        qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]
34.                                     stock[p][t_bis_bis]←inter_Prod
35.                                 sinon
36.                                     qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]←
                                        qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]- inter_Prod
37.                                     inter_Prod←0
38.                                 fin si

```



```
39.          t_bis_bis←t_bis_bis+1
40.      fin tant que
41.  fin si
42.  fin si
43.  h←h+1
44.  fin tant que
45.  k←k+1
46.  fin tant que
47.  k←0
48.  tant que k<affectation[p].size() && qtés_A_Produire[p][t]>0 faire
49.      u←affectation[p]
50.      f←famille[p]
51.      h←0
52.      tant que h < composition_Usine[u].size() &&
53.          qtés_A_Produire[p][t] > 0 faire
54.          l←composition_Usine[u][h]
55.          si NON (l ∈ l ligne_Prod_Utilisées[p][t_bis]) alors
56.              idem lignes 7 à 17 de Production_Au_Plus_Juste(p,t)
57.              si inter_Prod > max(qté_A_Produire[p][t],vol_min[l]) &&
58.                  capacité[p][l]=1 && (famille_Pdte[f][t]=1 OU
59.                      nb_Famille[l][t] < nb_Max_Famille[l]) alors
60.                  si inter_Prod > somme_Prod alors
61.                      idem lignes 19 à 39 de
62.                          Production_Au_Plus_Juste(p,t) en remplaçant t
63.                          par t_bis et qtés_A_Produire[p][t] par somme_Prod
64.                  tant que somme_Prod>0 faire
65.                      somme_Prod←somme_Prod-
66.                          qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]
67.                      qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]←0
68.                      stock[p][t_bis_bis]←somme_Prod
69.                      t_bis_bis←t_bis_bis+1
70.                  fin tant que
71.              sinon
72.                  idem lignes 19 à 39 de
73.                      Production_Au_Plus_Juste(p,t)
74.                      en remplaçant t par t_bis et
75.                      qtés_A_Produire[p][t] par inter_Prod
76.                  t_bis_bis←t_bis
77.                  tant que somme_Prod>0 faire
78.                      somme_Prod←somme_Prod-
79.                          qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]
80.                      qtés_A_Produire[p][t_bis_bis]←0
81.                      stock[p][t_bis_bis]←somme_Prod
82.                      t_bis_bis←t_bis_bis+1
83.                  fin tant que
84.              fin si
85.          fin si
86.          h←h+1
87.      fin tant que
88.      k←k+1
89.  fin tant que
90.  t_bis←t_bis-1
91.  fin tant que
92.  fin pour
93.  fin pour
94.  Fin
```

Annexe 4 : algorithme de recherche locale – suppression des multi-affectations

Partie 3.5.2 du chapitre IV

Algorithme 21 : suppression des multiaffectations non pertinentes

Procédure Réduction_Multi_alloués(*s*)

Début

```

1.  ag_Pdt_Multi_alloués_Temp ← ag_Pdt_Multi_alloués
2.  rep ← 0
3.  tant que ag_Pdt_Multi_alloués_Temp.size() > 0 && rep < K faire
4.    réponse ← FAUX
5.    tant que réponse = FAUX && ag_Pdt_Multi_alloués_Temp.size() > 0 faire
6.      p ← aléatoire(ag_Pdt_Multi_alloués_Temp)
7.      suppression(p, ag_Pdt_Multi_alloués_Temp)
8.      si NON (p ∈ ag_Pdt_Multi_affectés_Init) alors
9.        réponse ← VRAI
10.     fin si
11.   fin tant que
12.   si réponse = FAUX alors
13.     rep ← K
14.   sinon
15.     f ← famille[p]
16.     copie(affectation, affectation_Temporaire)
17.     fitness_Temp ← F(s)
18.     copie(ressource_Tot, dimensionnement_temporaire)
19.     ressource_Tot[p] ← M
20.     u ← aléatoire(usine_Visite_Possible_En_Cours[p])
21.     remise_A_Zero(affectation[p])
22.     affectation[p] ← u
23.     si nb_Elem_Multi_Famille[f] = 1 alors
24.       pour tout agrégat produit p_Bis de f différent de p faire
25.         ressource_Tot[p] ← M
26.         remise_A_Zero(affectation[p])
27.         affectation[p] ← u
28.       fin pour
29.     fin si
30.     F(s) ← évaluation(s)
31.     si F(s) < fitness_Temp alors
32.       F(s) ← fitness_Temp
33.       copie(affectation_Temporaire, affectation)
34.       copie(dimensionnement_temporaire, ressource_Tot)
35.       rep ← rep + 1
36.     sinon
37.       suppression(p, ag_Pdt_Multi_alloués)
38.     fin si
39.   fin si
40. fin tant que
41. retourner(s)

```

Fin

Annexe 5 : algorithme de recherche locale – suppression des modifications d'affectation non pertinentes

Partie 3.5.3 du chapitre IV

Algorithme 22 : suppression des modifications d'affectation non pertinentes

Procédure Réduction_Modification (s)

Début

```
1.  copie(liste_Ag_Pdt, liste_Ag_Pdt_Temp)
2.  tant que liste_Ag_Pdt_Temp.size()>0 faire
3.      p←-1
4.      tant que p=-1 && liste_Ag_Pdt_Temp.size()>0 faire
5.          p←aléatoire(liste_Ag_Pdt_Temp)
6.          suppression(p, ag_Pdt_Multi_alloués_Temp)
7.          si p ∈ nouv_Ag_Pdt OU affectation[p]=affectation_Init[p] alors
8.              p←-1
9.          fin si
10.     fin tant que
11.     si p<-1 alors
12.         copie(affectation, affectation_Temporaire)
13.         copie(F(s), fitness_Temp)
14.         copie(ressource_Tot, dimensionnement_temporaire)
15.         ressource_Tot[p]←M
16.         affectation[p]←affectation_Init[p]
17.         F(s) ←évaluation(s)
18.         si F(s) < fitness_Temp alors
19.             F(s)← fitness_Temp
20.             copie(affectation_Temporaire, affectation)
21.             copie(dimensionnement_temporaire, ressource_Tot)
22.         fin si
23.     fin si
24. fin tant que
25. retourner(s)
```

Fin

Annexe 6 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à faible mobilité de la production – modèle de flot mono-période

Partie 3.2.1 du Chapitre VI

Notations :

Ensemble :

- S : ensemble des sommets ;
 A : ensemble des arc (i,j) ($i \in S, j \in S, i \neq j$) ;
 $A', A' \subset A$: ensemble des arcs symbolisant un transfert entre deux couples ;
 L : ensemble des lignes de production.

Paramètres :

- $max_{i,j} (i,j) \in A$: capacité maximale de l'arc (i,j) , $((i,j) \in A)$;
 $min_{i,j} (i,j) \in A'$: capacité minimale de l'arc (i,j) , $((i,j) \in A')$;
 $c_{i,j} (i,j) \in A$: coût associé à l'arc (i,j) , $((i,j) \in A)$;
 $s, s \in S$: source ;
 $w, s \in S$: puits ;

Variables :

- $f_{i,j} (i,j) \in A$: flot circulant sur l'arc (i,j) , $((i,j) \in A)$;
 $x_{i,j} (i,j) \in A'$: variable binaire valant 0 si le flot circulant sur l'arc (i,j) , $((i,j) \in A')$ est nul et 1 sinon.

Modèle : Maximisation du flot – 1^{ère} étape du MILP

$$\text{Max : } F^{MAX} \quad (1)$$

s.t.

$$F^{MAX} = \sum_{(s,i) \in A} f_{s,i} \quad (2)$$

$$\sum_{(j,i) \in A} f_{j,i} = \sum_{(i,k) \in A} f_{i,k}, \quad \forall i \in S, i \neq s, i \neq w \quad (3)$$

$$f_{i,k} \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A \setminus A' \quad (4)$$

$$f_{i,k} \leq cmax_{i,j}, \quad \forall (i,j) \in A \setminus A' \quad (5)$$

$$f_{i,k} \leq cmax_{i,j} \times x_{i,j}, \quad \forall (i,j) \in A' \quad (6)$$

$$f_{i,k} \geq cmin_{i,j} \times x_{i,j}, \quad \forall (i,j) \in A' \quad (7)$$

$$x_{i,j} \in \{0; 1\}, \quad \forall (i,j) \in A' \quad (8)$$

$$f_{i,j} \in N, \quad \forall (i,j) \in A \quad (9)$$

Modèle : Minimisation des coûts – 2^{ème} étape du MILP

$$\text{Min : } \sum_{(i,j) \in A} f_{i,j} \times c_{i,j} \quad (10)$$

s.t.

$$\sum_{(s,i) \in A} f_{s,i} = F^{MAX} \quad (11)$$

contraintes ((3)-(9)).

Explications :

Les équations (1)-(9) définissent la première étape du MILP. Ainsi, la fonction objectif (1)-(2) correspond à la maximisation du flot circulant sur les arcs provenant de la source. Notons que, compte tenu de la contrainte d'égalité des flots (3), l'égalité (2) aurait pu tout aussi bien porter sur les arcs ayant pour extrémité finale le puits. Les équations (4)-(5), quant à elles, imposent la positivité et le respect des capacités maximales sur les arcs à capacité minimale nulle. A l'inverse, par le recours à la variable binaire $x_{i,j}$ ($(i,j) \in A'$), les inégalités (6) et (7) imposent que tout flot, circulant sur les arcs possédant une capacité minimale différente de zéro, soit supérieur à cette valeur ou bien nul.

Le flot maximal F^{MAX} , pouvant circuler entre la source s et le puits w dans le graphe, ayant été évalué ; la seconde étape consiste à trouver la configuration minimisant les coûts associés à l'utilisation des arcs (fonction objectif 10) tout en respectant cette valeur (équation 11) ainsi que les autres contraintes (3)-(9).

A l'issue de cette résolution est ainsi obtenue la configuration d'utilisation des différents arcs permettant de faire circuler le maximum de flots possible, entre la source et le puits dans le graphe, à coût minimum.

Annexe 7 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à forte mobilité de la production

Partie 3.2.2.4 du chapitre VI,

Notations :

Ensemble :

P	: ensemble des agrégats produits ;
T	: ensemble des périodes ;
U	: ensemble des usines ;
L	: ensemble des lignes de production.

Paramètres :

$d_{p,t}$: demande de l'agrégat produit p ($p \in P$) lors de la période t ($t \in T$);
$cm_{l,t}$: capacités maximales de la ligne de production l ($l \in L$) lors de la période t ($t \in T$);
$S_{init,t}$: stocks initiaux de l'agrégats produit p ($p \in P$);
$p_{vente,p}$: prix de vente de l'agérat produits p ($p \in P$) ;
cm_p	: coût d'adaptation des machines pour la production de l'agrégat produit p ($p \in P$) ;
c^{nsat}	: coût par unité de capacité non saturée ;
c^{flexV}	: surcoût issu du recours à la flexibilité volume ;
c^{stock}	: coût unitaire de stockage périodique;
M	: grand entier.

Variables :

$std_{p,t}$: demande de l'agrégat produits p ($p \in P$) satisfaite lors de la période t ($t \in T$) ;
$npdt_{p,l,t}$: nombre d'unités de l'agrégat produit p ($p \in P$) fabriqué sur la ligne de production l ($l \in L$) lors de la période t ($t \in T$);
$stk_{p,t}$: niveau des stocks de l'agrégat produits p ($p \in P$) à la fin de la période t ($t \in T$) ;
$capa_l$: capacité « marche courante » de la ligne de production l ($l \in L$) ;
$fv_{l,t}$: niveau de la flexibilité volume utilisée sur la ligne de production l ($l \in L$) lors de la période t ;
$nSat_{l,t}$: nombre d'unités de capacités non utilisées sur la ligne de production l ($l \in L$) lors de la période t ($t \in T$);
$adapt_{p,l}$: variable binaire valant 1 si la ligne de production l ($l \in L$) a été adaptée afin de pouvoir produire l'agrégat produit p et 0 sinon ;
$afv_{l,t}$: variable binaire valant 1 si au moins une unité de flexibilité volume est utilisée sur la ligne de production l ($l \in L$) lors de la période t ($t \in T$);
$aSat_{l,t}$: variable binaire valant 1 si au moins une unité de capacité de la ligne de production l ($l \in L$) n'est pas utilisée lors de la période t ($t \in T$).

Modèle :

$$\text{Max : } Z \quad (1)$$

s.t.

$$Z = \sum_P \sum_T std_{p,t} \times pvente_p - (\sum_L \sum_P adapt_{p,l} \times cm_p + \sum_L \sum_T (fv_{l,t} \times c^{flexv} + nSat_{l,t} \times c^{nsat}) + \sum_P \sum_T (stk_{p,t} \times c^{stock}) \quad (2)$$

$$std_{p,1} + stk_{p,1} = Sinit_p + \sum_l nbpdt_{p,l,1}, \quad \forall p \in P \quad (3)$$

$$std_{p,t} + stk_{p,t} = stk_{p,t-1} + \sum_l nbpdt_{p,l,t}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T, t > 1 \quad (4)$$

$$std_{p,t} \leq d_{p,t}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (5)$$

$$nbpdt_{p,l,t} \leq M \times adapt_{p,l}, \quad \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_P nbpdt_{p,l,t} = capa_l + fv_{l,t} - nSat_{l,t}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (7)$$

$$capa_l + fv_{l,t} \leq cmax_{l,t}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (8)$$

$$afv_{l,t} + asat_{l,t} \leq 1, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (9)$$

$$nSat_{l,t} \leq M \times asat_{l,t}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (10)$$

$$fv_{l,t} \leq M \times afv_{l,t}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (11)$$

$$capa_l \geq nSat_{l,t}, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (12)$$

$$(afv_{l,t}, asat_{l,t}) \in \{0; 1\}^2, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (13)$$

$$adapt_{p,l} \in \{0; 1\}, \quad \forall p \in P, \forall l \in L \quad (14)$$

$$(std_{p,t}, stk_{p,t}) \in N^2, \geq 0, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (15)$$

$$nbpdt_{p,l,t} \in N, \geq 0, \quad \forall p \in P, \forall l \in L, \forall t \in T \quad (16)$$

$$nsat_{l,t}, fv_{l,t} \in N^2, \geq 0, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (17)$$

$$capa_l \in N, \geq 0, \quad \forall l \in L \quad (18)$$

Explications :

Les deux premières contraintes ((3) et (4)) de ce modèle modélisent l'équilibre des stocks respectivement pour la première période et le reste de l'horizon. Elles impliquent que pour chaque produit, la quantité fabriquée soit répartie entre stocks et satisfaction de la demande. Cette dernière est tout naturellement bornée, pour chaque produit à chaque période, par la demande correspondante (équation (5)). De plus, un produit peut être fabriqué sur une ligne de production uniquement si les machines de celle-ci ont été adaptées. Ceci est représenté par l'équation (6) attribuant la valeur 1 à la variable binaire $adapt_{p,l}$ dès lors qu'un produit de type p est fabriqué sur la ligne de production l au moins une fois sur tout l'horizon. Les quantités produites sont également restreintes par les capacités disponibles. Cet aspect est introduit par l'équation (7), impliquant que la somme des quantités produites sur une ligne de production l lors d'une période

t , soit égale à la somme de sa capacité et de la flexibilité volume utilisée retranchée du nombre de ses unités de capacités non utilisées. Ceci doit être associé aux contraintes (8) et (9). La première impose que pour chaque ligne de production la somme de la capacité ainsi que de la flexibilité volume utilisée lors de la période considérée soit inférieure à la capacité maximale disponible tandis que la seconde, quant à elle, impose que l'on ne recourt pas à la flexibilité volume lorsque la ligne considérée n'est pas saturée. Ceci est assuré par le recours aux variables binaires $aSat_{it}$ et a/V_{it} dont les valeurs sont données par (10) et (11) respectivement. Ainsi, de par la recherche du profit maximum et donc de l'arbitrage entre coûts de non saturation des capacités et d'utilisation de la flexibilité volume, des valeurs seront affectées à ces dernières ainsi qu'aux capacités. Il est important de remarquer, que tout comme (9), l'équation (12), imposant que le nombre d'unités de capacités non utilisées sur une ligne de production soit inférieur à cette dernière, constitue une contrainte de coupe, c'est-à-dire destinée à accélérer la résolution du modèle. En effet, de par la fonction objectif et les différents coûts associés, celles-ci sont implicitement introduites et respectées.

Table de matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Contexte et problématique	7
1. Introduction	9
2. Contexte	9
2.1. Limos	9
2.2. Michelin.....	10
3. Problématique.....	12
3.1. La notion de la Supply Chain	12
3.1.1. Définition d'une Supply Chain	12
3.1.2. Le cas spécifique de la Supply Chain Michelin	13
3.2. La prise de décisions au sein d'une Supply Chain : un processus hiérarchisé	14
3.2.1. Les différents niveaux de planification	14
3.2.2. La planification stratégique dans le contexte Michelin.....	17
3.3. Standardisation et familles de planification.....	18
3.4. Les contraintes de production.....	24
3.5. Les contraintes de ressources	26
3.6. Prise en compte d'un état initial	27
3.7. Prise en compte de l'incertitude	28
3.7.1. Incertitude et robustesse	28
3.7.2. Dimensionnement de la flexibilité	29
3.8. Objectif industriel.....	30
4. Travaux de recherche	31
4.1. Une extension du problème industriel	31
4.1.1. Premier objectif de la thèse : modèle d'affectation et de dimensionnement stratégique.....	31
4.1.2. Réalisation d'un environnement intégré de planification	33
4.2. Une thématique de recherche : le Supply Chain Network Design	34
5. Conclusion.....	35
Chapitre II : Le Supply Chain Network Design - état de l'art	37
1. Introduction	39
2. Le SCND : définition	39
3. Le SCND dans un contexte déterministe	42
3.1. Modèles pour l'implantation des entités d'une Supply Chain.....	42
3.2. Modèles de planification stratégique	44
3.3. Modèles pour le dimensionnement capacitaire	46
3.4. Conclusion.....	49
4. SCND et incertitude	50
4.1. Prise en compte de l'incertitude	51
4.1.1. Incertitude : définitions et terminologies	51
4.1.2. Les différents modèles	54
4.2. Modèles stochastiques	55
4.3. Modèles robustes	59
4.4. Conclusion.....	60
5. SCND et flexibilité.....	61
5.1. Caractérisation et utilisation de la flexibilité.....	61
5.1.1. Définition et classification de la flexibilité	61

5.1.2.	Stratégies d'utilisation de la flexibilité.....	63
5.1.3.	Terminologie liée à la notion de flexibilité	65
5.2.	Modèles d'évaluation	65
5.3.	Modèles de dimensionnement	66
5.4.	Conclusion.....	72
6.	Positionnement de nos travaux au sein de la littérature : conclusion.....	72
7.	Conclusion.....	80

Chapitre III : Modélisation du problème ASPDRF dans un contexte déterministe..... 83

1.	Introduction	87
2.	Modélisation des contraintes industrielles	87
2.1.	Modélisation du système de production d'une Supply Chain	88
2.2.	Notations.....	89
2.2.1.	Ensembles.....	89
2.2.2.	Paramètres	89
2.2.3.	Variables.....	90
2.3.	Modélisation des contraintes de ressources.....	91
2.3.1.	Les contraintes de dimensionnement	91
2.3.2.	Evaluation du nombre de transferts de ressources	93
2.4.	Prise en compte d'une solution initiale.....	93
2.4.1.	Limitation du nombre de modifications pouvant être apportées à la solution initiale	93
2.4.2.	Nombre limite d'agrégats multi-affectés.....	94
2.4.3.	Modification du dimensionnement des ressources initial	95
2.4.4.	Contraintes relatives à la gestion des nouveaux agrégats produits	95
2.5.	Standardisation : temps de changements de dimension et flexibilité des lignes de production.....	96
2.6.	Fonction objectif : maximisation du profit.....	97
2.7.	Formalisation mathématique	99
3.	Modèle linéaire.....	102
3.1.	Contraintes de production.....	102
3.2.	Contraintes de capacités	103
3.3.	Contraintes inhérentes à la solution initiale.....	104
3.3.1.	Limitation du nombre de changements d'affectation.....	104
3.3.2.	Contraintes relatives au nombre d'agrégats produits alloués à plus d'une usine	105
3.4.	Contraintes de gestion de ressources	106
3.4.1.	Contraintes de dimensionnement des ressources	106
3.4.2.	Evaluation du nombre de transferts de ressource entre les usines	107
3.5.	Formulation de la fonction objectif	108
3.6.	Modèle linéaire : formulation générale	109
3.7.	Applications numériques	112
3.7.1.	Exploitation des résultats : illustration.....	112
3.7.2.	Etude des temps de résolution associés.....	117
4.	Conclusion.....	119

Chapitre IV : Métaheuristique pour le problème ASPDRF 121

1.	Introduction	125
2.	Définition	125
2.1.	Heuristique – Métaheuristique.....	125

2.2. Greedy Randomized Adaptative Search Procedure (GRASP)	126
3. GRASP pour le problème ASPDRF dans un contexte déterministe	127
3.1. Fonctionnement global de la méthode	127
3.1.1. Principe de la méthode	127
3.1.2. Décomposition de la méthode en divers fonctions	128
3.2. Phase de construction d'une solution	130
3.2.1. Principe général	130
3.2.2. Choix des agrégats produits	131
3.2.3. Génération d'une affectation de la production à partir d'une solution initiale	132
3.3. Evaluation d'une solution	134
3.3.1. Principe général d'évaluation d'une solution	134
3.3.2. Calcul des quantités à produire et définition de l'ordre de parcours des familles de standardisation	135
3.3.3. Planification	138
3.3.4. Phase de constitution des stocks	144
3.4. Calcul de la fonction objectif – dimensionnement des ressources	146
3.4.1. Dimensionnement des ressources	146
3.4.2. Evaluation des transferts de ressource	147
3.4.3. Fonction objectif : rappel et évaluation	151
3.5. Recherches locales	153
3.5.1. Principe générale de la recherche locale	153
3.5.2. Réduction du nombre d'agrégats produit multi-affectés	153
3.5.3. Réduction du nombre de changements d'affectations vis-à-vis de la solution initiale	154
4. Performance de la métaheuristique	155
4.1. Evaluation de la qualité des résultats – prise en compte d'instances de petites tailles 155	
4.2. Evaluation de la qualité du GRASP– Application à des instances de grande taille	160
4.3. Paramétrage du Grasp : influence du nombre maximum de périodes de stocks et des quantités minimum à produire	167
4.4. Evaluation des temps d'exécution	169
5. Conclusion	171
Chapitre V : Métaheuristique dans un contexte incertain	173
1. Introduction	175
2. Intégration du GRASP dans un processus de simulation de Monte Carlo	175
2.1. Principe général : la simulation de Monte Carlo	175
2.2. Modification du GRASP pour la prise en compte de l'incertitude relative à la demande	176
2.2.1. GRASP modifié	176
2.2.2. Processus de génération des scénarios de demande	177
3. Application numérique	178
3.1. Illustration du fonctionnement du GRASP	178
3.2. Mise en œuvre du GRASP dans le cadre de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe Michelin	186
4. Conclusion	187
Chapitre VI : Environnement intégré de planification	189
1. Introduction	191
2. Schématisation de l'environnement intégré de planification	191

2.1.	Principe général	191
2.2.	Schéma global du processus intégré de planification	192
3.	Processus de planification stratégique.....	195
3.1.	Dimensionnement capacitaire.....	195
3.2.	Déploiement capacitaire : dimensionnement de la flexibilité volume et de la mix flexibilité	195
3.2.1.	Cas des industries à forte mobilité de la production	196
3.2.2.	Cas des industries à faible mobilité de la production.....	199
3.3.	Conclusion sur l'étape de planification stratégique.....	207
4.	Processus de planification tactique	207
4.1.	Démarche de modélisation	207
4.2.	Modèle tactique pour la définition du Programme Directeur de Production	208
4.3.	Conclusion sur l'étape de planification tactique.....	211
5.	Processus de planification opérationnel	212
5.1.	Hypothèses et simplification	212
5.2.	Modèle linéaire pour l'établissement d'un plan de production court terme.....	214
5.3.	Application du modèle de planification opérationnelle.....	218
5.4.	Temps de résolution associés à l'étape de planification opérationnelle.....	220
5.5.	Conclusion sur le processus de planification opérationnel.....	222
6.	Temps de résolution et taille des problèmes considérés	222
7.	Conclusion.....	223
	Conclusion générale	225
	Bibliographie.....	229
	Annexes	243
	Annexe 1 : algorithme de planification de la production par agrégation de la demande	245
	Annexe 2 : algorithme de planification de la production par répartition de la production	246
	Annexe 3 : algorithme associé au processus de constitution des stocks	247
	Annexe 4 : algorithme de recherche locale – suppression des multi-affectations	249
	Annexe 5 : algorithme de recherche locale – suppression des modifications d'affectation non pertinentes	250
	Annexe 6 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à faible mobilité de la production – modèle de flot mono-période	251
	Annexe 7 : MILP pour le déploiement capacitaire dans le cadre d'une industrie à forte mobilité de la production.....	253

Planification stratégique d'une Supply chain sous contraintes d'incertitude : affectation de la production et dimensionnement des ressources.

Ce doctorat a porté, pour partie, sur une problématique dérivée du cas de la Supply Chain Tourisme Camionnette Europe de la société Michelin. Celle-ci a été formulée comme un problème d'Affectation Stratégique des Productions et de Dimensionnement des Ressources ainsi que de la Flexibilité (ASPDFR) du système de production d'une Supply Chain dans un contexte incertain. Ce problème ASPDRF présentant un certain nombre de spécificités rendant impossible le recours à des méthodes existantes ; un modèle linéaire dédié ainsi qu'une métaheuristique de type « Greedy Randomized Adaptive Search Procedure » (GRAPS) ont été construits. Cette dernière a permis l'obtention de résultats de bonnes qualités et industriellement exploitables et, ce, même dans le cas d'instances de très grandes tailles ; instances ne pouvant être résolues par le recours à la programmation linéaire. Ceci constitue, en plus de l'originalité de certaines contraintes considérées, l'un des apports de ces travaux de doctorat vis-à-vis de la thématique du Supply Chain Network Design à laquelle ils se rattachent. Au-delà de la résolution du problème ASPDRF, ces travaux de doctorat ont également porté sur la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant les horizons stratégique, tactiques et opérationnelles ainsi que les différentes boucles de rétroaction associées. Celui-ci a pour vocation d'apporter une aide au manager lors des différentes étapes de prises de décisions associées à ces horizons de planification. Cet environnement, constitué du GRASP proposé ainsi que de modèles de flot et de modèles linéaires spécifiques, présente lui aussi la particularité de pouvoir adresser des problèmes de grandes tailles.

Mots clés : Supply Chain Management, Planification stratégique, affectation de la production, flexibilité, incertitude, programmation linéaire, GRASP.

Strategic planning of a Supply chain under constraints of uncertainty: production allocation and resources desing.

Works made during this PhD deal with a problem arising from the Europe Tourism Supply Chain of the firm Michelin. They are formulated as a Strategic Production Allocation, Resource sizing and Flexibility design problem of a Supply Chain Manufacturing System in an uncertain context. Because of it's specificities, this problem can't be solved using existing methods. Consequently, a dedicated linear program and a metaheuristic have been defined. This metaheuristic corresponds to a dedicated « Greedy Randomized Adaptive Search Procedure » (GRAPS). It has led to good quality solutions with real industrial meaningful even in the case of large scale problems. As originality of considered constraints, this result is a contribution regarding existing studies about Supply Chain Network Design problems. Moreover, in the context of this PhD, a global planning system dealing with strategic, tactical and operational planning has been defined. It constitutes a helping tool to manage Supply Chain regarding several options and risky situations. This system consists of the proposed GRASP but also of several dedicated flow models and linear models. It is able to tackle large scale problems in a rather short time.

Key words: Supply Chain Management, Strategic planning, production allocation, flexibility, uncertainty, linear programming, GRASP.